

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DISERTAČNÍ PRÁCE

KOMPENZACE ODPRUŽENÍ U VELKOPLOŠNÝCH KAROSÁŘSKÝCH
VÝLISKŮ

Ing. Tomáš Pačák

Školitel: *doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Praha

Červen, 2018

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Kompenzace odpružení u velkoplošných karosářských výlisků“ vypracoval pod vedením školitele samostatně a za použití v práci uvedených pramenů a literatury. Dále prohlašuji, že tato disertační práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Datum:

.....
podpis

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Viktoru Kreibichovi, CSc. za jeho cenné rady a trpělivost při vedení mé disertační práce. Rovněž bych chtěl poděkovat Ing. Františku Tatíčkoví, Ph.D. a potom celému oddělení konstrukce lisovacího nářadí ve firmě ŠKODA AUTO, a.s., za vstřícnost a pomoc při získání potřebných informací a podkladů.

.....
Podpis

Anotace

Název práce: Kompenzace odpružení u velkoplošných karosářských výlisků

Autor: Ing. Tomáš Pačák

Školitel: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.

Odborný

školitel: Ing. František Tatíček, Ph.D.

Katedra: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie

Klíčová slova: odpružení, lisování, tváření karoserie vozu, automobilový průmysl, AutoFrom

Abstrakt: Předkládaná disertační práce se zaměřuje na vyřešení technologického problému odpružení v oblasti plošného tváření a na analýzu příčin, které tento jev ovlivňují. Hlavním cílem disertační práce je návrh modifikovaného řešení současného přístupu k problematice odpružení. Jedná se zejména o návrh metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení s využitím numerických simulací. Motivací hlavního cíle disertační práce je současný neefektivní přístup k problematice odpružení v praxi. Na základě současného přístupu vznikají nadměrné časové a finanční náklady na korekce lisovacího nářadí. Ty ne vždy vedou k jednoznačnému zlepšení výsledné přesnosti výlisků. Ke splnění hlavního cíle disertační práce slouží dílčí cíle práce, resp. vlastní rešerše problematiky a vlastní experimenty. V nich je pozornost věnována okrajovým podmínkám lisovacího procesu, které jev odpružení více či méně ovlivňují. Navržená metodiky je následně ověřována na skutečných dílech karoserie. Jedná se o díly pátých dveří a blatníku vozů SEAT Ateca a ŠKODA Superb. Dizertační práce je prováděna ve spolupráci s oddělením konstrukce lisovacího nářadí ve společnosti ŠKODA AUTO, a.s, kde je navržené modifikované řešení současného stavu využíváno ke zvýšení kvality a přesnosti lisovacího procesu částí karoserie a ke zvýšení kvality konečného produktu.

Rozsah práce a příloh

Počet stran	157
Počet obrázků	112
Počet tabulek	18
Počet rovnic	39
Počet příloh	5

Annotation

Title: Compensation of the springback behavior in large sheet metal stamping
Autor: Ing. Tomáš Pačák
Supervisor: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
Supervisor specialist: Ing. František Tatíček, Ph.D.
Department: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Manufacturing Technology

Keywords: springback, sheet metal stamping, car body forming, automotive, AutoForm

Abstract: Dissertation focuses on the in depth description of the springback phenomenon in the field of the sheet metal forming and furthermore on the parameters that affect the phenomenon the most. Main objective of the thesis is to design a modified solution of the current approach to the springback issue. Modified solution is designed as a methodology with focus on the analysis and compensation of springback with help of numerical simulation. Motivation behind the main goal of the dissertation is an ineffective solution of the springback phenomenon in current praxis. Based on the current solution, excessive time and financial cost due to correction on the press tools emerge. These corrections not always lead to better, final accuracy of the stampings. To achieve main goal, smaller sub-goals are applied (mainly in form of own experiments). In these experiments main focus is on parameters which less or more influence the springback phenomenon. Designed methodology is verified on real car body parts. These parts are from SEAT Ateca (fifth doors) and ŠKODA Superb (fender). The dissertation is carried out with help of the department of the press tools design in ŠKODA AUTO, a.s. There, the methodology is used for improving quality and accuracy of the stamping process of the car body parts and for improving quality of the final product.

Volume of work

Number of pages	157
Number of pictures	112
Number of tables	18
Number of equations	39
Number of attachments	5

Obsah:

Seznam použitých zkratk a symbolů	8
Vysvětlení použitých technických termínů	10
1. Úvod	12
2. Analýza problematiky odpružení	14
2.1 Technologie lisování	14
2.2 Stávající situace v řešení problematiky odpružení	15
2.2.1 Současný přístup k řešení problematiky odpružení v praxi	16
2.3 Obecný popis problematiky odpružení	19
2.4 Možnosti v přístupu k problematice odpružení	20
2.4.1 Odpružení v případě jednoduchého ohybu	21
2.4.2 Tuhý, ideálně plastický přístup	23
2.4.3 Elastický, ideálně plastický přístup	23
2.4.4 Elasticko plastický přístup	24
2.4.5 Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení	25
2.5 Klasifikace představitelů odpružení	27
2.6 Analýza okrajových podmínek	28
2.6.1 Materiálové podmínky	29
2.6.2 Konstrukční podmínky	33
2.6.3 Technologické podmínky	34
2.7 Možnosti eliminace odpružení	35
2.7.1 Eliminace odpružení úpravou lisovacích nástrojů	35
2.7.2 Eliminace odpružení úpravou výlisku	36
2.7.3 Ostatní možnosti eliminace odpružení	37
2.8 Metody kompenzace odpružení úpravou geometrie nástroje	38
2.8.1 Podrobný popis kompenzační metody „DA – Displacement Adjustment“	39
3. Numerické simulace	41
3.1 Úvod do numerických simulací	41
3.2 Metoda konečných prvků	42
3.2.1 Popis použití MKP v numerických simulacích	44
3.2.2 Možnosti ve výběru výpočtového elementu	46
4. Cíle dizertační práce	49
5. Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely	50
6. Dílčí experimenty pro návrh konečné metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení	54
6.1 Analýza vlivu přidržovacího tlaku na velikost odpružení při tahu U profilu	54
6.2 Experiment závislosti použitého materiálu na velikost odpružení při jednoduchém ohybu	57
6.2.1 Výběr materiálů pro sledování vlivu mechanických vlastností na velikost odpružení	58
6.2.2 Popis experimentu a porovnání výsledků	59
6.3 Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu	64
6.3.1 Úvod do přesnosti numerických simulací	64
6.3.2 Porovnání výpočtů na základě jednotlivých metod nastavení výpočetní sítě	67
6.3.3 Závislost nastavení výpočetní sítě na přesnost numerické simulace	68
6.3.4 Závěr experimentu závislosti nastavení numerické sítě na přesnosti numerické simulace	72
6.4 Vliv použité geometrie lisovacího nářadí v numerické simulaci na přesnost odpružení	73
7. Problematika vyhodnocení odpružení v lisovacím procesu	76
7.1 Současné přístupy k analýze odpružení	76
7.1.1 Popis analýzy odpružení v reálném procesu výroby	77
7.1.2 Popis virtuální analýzy odpružení v numerické simulaci	79
7.1.3 Poloha dílu při analýze odpružení	81
7.1.4 Problematika vlivu gravitace dílu při analýze odpružení	83
7.2 Návrh standardů pro nastavení numerické simulace	86
7.2.1 Nastavení výpočetní sítě MKP	87

7.2.2	Nastavení procesu lisování	87
7.2.3	Nastavení pomocných nástrojů pro vyhodnocení velikosti odpružení.....	88
7.3	Návrh metodiky analýzy odpružení.....	90
8.	Analýza okrajových podmínek se zaměřením na problematiku odpružení.....	92
8.1	Optimalizace procesu s využitím speciálního výpočtového modulu SIGMA	92
8.2	Vliv jednotlivých parametrů na velikost odpružení.....	95
8.3	Nastavení numerické simulace s ohledem na okrajové podmínky lisovacího procesu	99
9.	Metodika kompenzace odpružení	101
9.1	Návrh strategie pro kompenzaci odpružení	102
9.2	Ověření metodiky kompenzace odpružení	104
9.2.1	Díl 1. kategorie – vnější spodní páte dveře SEAT Ateca	106
9.2.2	Díl 2. kategorie – vnitřní páte dveře SEAT Ateca	118
9.2.3	Díl 3. kategorie – blatník vozu ŠKODA Superb.....	127
9.3	Zhodnocení aplikované metodiky kompenzace odpružení.....	135
9.4	Diskuze k přínosu navrženého modifikovaného řešení	136
10.	Závěr.....	140
	Seznam použité literatury.....	144
	Seznam publikací autora dizertační práce	148
	Seznam použitých obrázků.....	153
	Seznam použitých tabulek.....	157

Příloha č. 1 - Ukázka vyplněného kontrolního listu numerické simulace na díl Hkau SEAT Ateca

Příloha č. 2 - Materiálový list DC06

Příloha č. 3 - Materiálový list DX57

Příloha č. 4 - Materiálový list HX220BD

Příloha č. 5 - Materiálový list HX340LAD

Seznam použitých zkratk a symbolů

Seznam použitých zkratk:

AHSS	Advanced high strength steels – komplexní vysokopevné oceli s vysokým obsahem legovacích prvků (oceli s fází jinou než feritickou nebo perlitickou, jedná se o martenzitické, bainitické či austenitické oceli)
B21	Beam element – dvou uzlový liniový element pro zjednodušené typy numerických výpočtů [32]
BH efekt	Bake Hardening – vlastnost materiálu s dodatečným zpevněním při vypalování laku
BM	Bauteilmodell – kompletní sestava lisovacího nářadí
CAD	Computer-aided Design – počítačem podporované projektování
CE (CE+)	Compact Evaluation - metoda výpočtu v programu AF R7
CPS8	Eight node plane stress element – osmi uzlový plošný element skořepinového typu. Ve směru osy X a Y je symetrický, ve směru osy Z je nulový [32]
DA	Displacement adjustment - metoda odpružení zpětného odpružení
FEM	Finite Element Method – metoda konečných prvků
FLD	Forming Limit Diagram – diagram mezních přetvoření
FV	Final Validation – metoda výpočtu v programu AF R7
FZL	Fahrzeuglage – poloha dílu na voze
HI	Heuristic Iterative – iterační metoda výpočtu na základě absence algoritmu
HKao	Heckklappe aussen oben – vnější horní páte dveře
HKau	Heckklappe aussen unten – vnější spodní páte dveře
HSLA	High strength low alloy steels – vysokopevné mikrolegované oceli (mangan až do 2%, uhlík 0,05 – 0,5%)
HSS	High strength steels – konvenční vysokopevné oceli (jednofázové feritické oceli s potencionální složkou perlitu)
KFL	Kotflügel – přední blatník
NCM	Data nástroje, na které jsou vytvářeny technologické postupy pro obrábění ploch nástroje
OP20	Operace 20 – lisovací operace č. 20 (10 tvorba nástřihu, 20 operace tažení, 30 střížná operace, 40, 50, 60, 70 operace se střížná a kalibrovací)
OTL	Oberertodlage – vrchní úvrať lisovacích nástrojů
PXL	Kolenopákový lis se servo pohonem
RPS	Reference Point System – referenční měřicí systém
SDA	Smooth displacement adjustment – upravená, přesnější metoda odpružení zpětného odpružení, která vychází z klasické DA metody
SF	Spring – Forward – metoda kompenzace zpětným odpružením
SI	Le Système International d'Unités – mezinárodní soustava jednotek fyz. veličin
SOP	Start of the production – začátek výroby vozu
TM	Teilmodell – model výlisku navrhnutý vývojem
TMA	Teilmodell Änderung – model výlisku s bombírovanou plochou
TRIP	Transformation induced plasticity – oceli s vysokým obsahem manganu (dochází zde k transformační fázi austenitu na martenzit během zatížení)
TWIP	Twinning induced plasticity - oceli s vysokým obsahem manganu (nedochází k transformační fázi austenitu, dochází k dvojčatění)
UTL	Untertodlage – spodní úvrať lisovacích nástrojů
WZL	Werkzeuglage – poloha dílu na nářadí

Seznam použitých jednotek:

Základní rozměry		
Značka	Veličina	Jednotky
ϕ , d	Průměr	mm
R , r	Poloměr	mm
t	Tloušťka	mm
l	Délka	mm
b	Šířka	mm
h	Výška	mm
α , β	Úhel	°

Základní veličiny		
Značka	Veličina	Jednotka
F	Síla	N
F_m	Maximální síla	N
F_t	Tažná síla	N
p	Tlak	Pa
A	Tažnost	%
R_m	Smluvní mez pevnosti	MPa
$R_{p0,2}$	Smluvní mez kluzu	MPa
ε	Poměrné prodloužení	-
e	Technologická deformace	-
n	Exponent def. zpevnění	-
r	Anizotropie	-
σ_{pt}	Pevnost v tahu	MPa
σ_D	Pevnost v tlaku	MPa
E	Modul pružnosti	MPa
K	Skalár napětí	-
M	Ohybový moment	Nm
$\varepsilon_{x,y,z}$	Deformace po obvodu	-
$\sigma_{x,y,z}$	Napětí po obvodu	MPa
σ_0	Napětí na mezi kluzu	MPa
w	Šířka kvadrantu	mm
c	Velikost kompenzace	
t, s	Pozice materiálu při odpruž.	-
a	Kompenzační faktor	-
R	Vnitřní síla (diskretizace sítě)	N
P	Vnější síla (diskretizace sítě)	N

Vysvětlení použitých technických termínů

Tvařitelnost - Tvařitelnost materiálu je schopnost materiálu vytvořit požadovaný jakostní výrobek plastickou deformací za tepla nebo za studena. [1]

Technologičnost konstrukce – Za technologičnost konstrukce lze považovat takové provedení výlisku, které splňuje základní požadavky týkající se jeho funkce a současně splňuje požadavky z hlediska jeho výroby a jeho použití. [2]

Odpružení materiálu – geometrická nestejnorodost tvaru způsobená průběhem elastické složky deformace v okamžiku, kdy dojde k ukončení tvářecího procesu.

Ztenčení materiálu – změna materiálu ve smyslu tloušťky plechu během tvářecího procesu. Oblasti s větším ztenčením materiálu poukazují na vznik porušení, resp. trhlin. Kritické hodnoty ztenčení materiálu se liší s použitým materiálem, avšak pro zajištění bezpečného a robustního tvářecího procesu je snaha nepřesáhnout ztenčení o více jak 25%.

Zvlnění materiálu – tvorba vln, která je způsobena průběhem materiálu během tvářecího procesu, kdy je materiál postupně vtahován do dutiny lisovacího nástroje. Vlivem geometrie nástroje a tvaru nástřihu dochází ke zvlnění materiálu nejčastěji v rohových oblastech, ve kterých se plechový materiál vtahuje z více stran.

Propad materiálu – lokální nerovnost materiálu způsobená nedostatečným vypnutím materiálu během tvářecího procesu, nejčastěji způsobená lokální složitou geometrií lisovacího nářadí. Na výlisku bez později aplikovaného laku je obtížné propady sledovat vizuálně. K analýze propadů je využíváno „brouskovací“ metody (lehké poškrábání plechu pomocí speciálního brousku, díky poškrábání lze sledovat průběh geometrie výlisku)

Metoda konečných prvků - Metoda konečných prvků je numerická metoda vyvinutá v 50. letech minulého století, která slouží k řešení rozsáhlých inženýrských problémů. Více k problematice MKP viz kapitola 3.2 *Metoda konečných prvků*. [3]

Šedá zóna dílu – oblast na výlisku, který v hotovém vozidle není vidět na první pohled. Jedná se o oblasti výlisku, které je možné vidět po otevření dveří, či kapoty. Např. vnitřní části na postranici v oblasti B a C sloupku.

Pohledová zóna dílu – oblast na výlisku, kterou lze vidět na první pohled. Jedná se o oblasti, které mají nejvyšší nároky na auditové závady (zvlnění materiálu, lokální propady a odpružení materiálu) jelikož vytváří celkový design vozidla.

Jednočinné tažení – tažení s jednoduchou kinematikou nástrojů, ve které má smykadlo s přídržovacím systémem a tažnicí stejný průběh.

Dvojčinné tažení – kinematika procesu je rozdělena na dvě fáze. V první fázi sjíždí vnější smykadlo s přídržovacím systémem a až v následující druhé fázi sjíždí vnitřní smykadlo s tažníkem (využití např. u lisování dílu pátých dveří vnitřních a vnějších).

Tahový model – model nástroje tažné operace OP20. Jedná se o geometrii, která vychází z TM modelu dílu. Tahový model navíc obsahuje tažné hrany a rádia, přídržovací plochu, aj. a vytváří tak tvar matrice a tažníku.

Robustnost lisovacího procesu – robustnost vyjadřuje schopnost lisovacího procesu dosáhnout správné vyrobitelnosti dílu i přes přirozené výkyvy v lisovacím procesu. Čím lépe je lisovací proces navržen, tím je i lepší celková robustnost lisovacího procesu. Robustnost je možné analyzovat v numerické simulaci změnou okrajových podmínek lisovacího procesu.

Povrchové vady geometrie – jedná se o typ auditové závady, při které dochází ke změně křivosti ve formě propadu materiálu. Propad materiálu je tvořen v řádech desetin až setin milimetru. Při aplikaci laku na dílu díky propadům dochází k lámání světelných paprsků, které narušují vizuální pohled na konečný produkt.

Tušírování – metoda využívaná při zapracování lisovacích nástrojů. S pomocí tuširovací barvy je možné po provedení pracovního zdvihu sledovat kvalitu spasování kontaktních ploch. Cílem je zajistit ideální kontakt v systému nástroj – plech – nástroj.

Výšepevný materiál – ocelový materiál o vyšších mezích pevnosti. Z němečiny označováno jako „hochfester Stahl“. Jedná se o materiály s hodnotami meze kluzu nad 500 MPa, např. DP500, DP800, HQ1500, aj.

Hlubokotažný materiál – ocelový nízkouhlíkový materiál s minimálním obsahem legujících prvků. Jedná se zejména o materiály využívané pro karosářské plechy (např. DC05, DC06, DX56, aj.)

1. Úvod

Dnešní doba je charakterizována rychlou reakcí na akceschopnost, poptávku a klade vysoké požadavky na konečné nízké provozní náklady a vysokou kvalitu všech výrobků. Tato situace je též v technologii plošného tváření, zejména v automobilovém průmyslu, kde jsou kladeny často až nereálné požadavky na kvalitu a přesnost výroby. Automobily jsou po dobu své životnosti často zatěžovány do extrémních podmínek. Pokud nejsou díly karoserie kvalitně a přesně vyrobené, slícované a v konečném případě smontované, mohou se objevit drobné vzhledové defekty již v počátcích provozu automobilu. V extrémních případech může docházet až k trhlinám či destrukci karoserie. Nejedná se ovšem jen o automobilový průmysl. Technologie plošného tváření se využívá také v dalších oborech, kde obdobně přesnost a kvalita hraje velmi důležitou roli.

V ideálním případě by měly být tvářené ocelové výrobky bez defektů. Takto dokonalého stavu není možné zatím dosáhnout. Již v minulosti bylo řadou autorů popsáno početné množství defektů, u kterých se dnes ví, jaký přístup pro jejich predikci a eliminaci zvolit. Je tomu např. u zvlnění, vyčerpání plasticity, iniciace trhliny, ztenčení materiálu aj. Díky stále se zvyšující úrovni poznání, jsou opět otevírány diskuze k dříve zanedbávaným, popř. nově zjištěným problematikám spojených s výrobním procesem. Jedním z velmi zásadních defektů, který provází lisovací procesy a stále nebyl dostatečně popsán, je geometrická nestabilita procesu, způsobená odpružením materiálu. Termín „odpružení materiálu“ je definován jako geometrická vada, která vzniká po uvolnění působících sil tvářecích nástrojů.

Problematikou odpružení materiálu se již dříve zabývala řada specialistů v technologii plošného tváření. V minulosti bylo této problematice věnováno značné úsilí. Např. autoři *Yoshida* a *Uemori* výrazně pomohli v popisu s úpravou materiálového modelu pro veliké plastické deformace. To vedlo k výraznému zlepšení predikce odpružení v numerických simulacích. Ovšem většina specialistů se v minulosti zabývala pouze odpružením materiálu v technologiích ohýbání či tažení jednoduchého tvaru (např. symetrické nádoby). V těchto případech je řešení predikce a kompenzace odpružení poměrně jednoduché. [4], [5]

V případě lisovacích procesů u složité geometrie dílců, vstupuje do tažného procesu oproti ohýbání více parametrů (přidržovací síla, vliv brzdící drážky či složitý tvar nástrojů). Ty mají zásadní vliv na výslednou velikost odpružení. K eliminaci odpružení lze v tažných procesech využít metodu kompenzace odpružení, její využití je nicméně velmi komplikované a zdouhavé. I pro zkušené konstruktéry lisovacích nástrojů je velmi složité definovat o kolik a v jakém směru správně geometrii nástroje kompenzovat. [6]

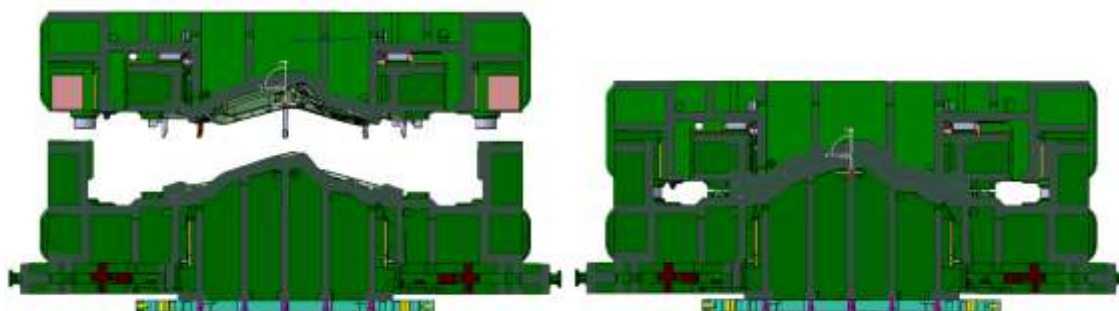
U tažných procesů dochází ke komplexnímu průběhu deformace a vzájemnému ovlivnění různých typů odpružení. I v jednoduchých tažných operacích, kde přetvoření materiálu nedosahuje deformací hlubokých tahů, je popis vzniku odpružení velice obtížný. U tvarově složitých dílů (např. části karoserie automobilu s pohledovými prolisy a s nepravidelnými přechody křivosti) je podrobný popis problematiky odpružení bez pomoci numerických simulací prakticky nemožný. Situace se navíc stává náročnější, pokud je odpružení nutné popsat v celém lisovacím procesu výlisku. V těchto případech lze jen velmi obtížně popsat odpružení pomocí doposud známých teorií. V praxi jsou zavedeny zjednodušené metody, které mají za cíl kompenzovat vzniklé odpružení (zásah do hlavní či vedlejší geometrie výlisku), nikoliv hledat okrajové podmínky, které by mohly velikost odpružení nejprve snížit.

V současné době, při stále dostupnějším a lépe aplikovatelném využití výpočetní techniky, se k popisu problematiky odpružení přímo nabízí využití numerických simulací. Například výpočetní program AutoForm R7 od Švýcarské společnosti AutoForm Development GmbH nabízí speciální výpočetní modul AutoForm Compensator pro predikci a kompenzaci odpružení. Dále se nabízí využití programu PAM-STAMP od společnosti ESI Group, který vlastní obdobné výpočetní moduly. V současné době jsou vedeny stále častější diskuze na téma odpružení. Tím je vytvářen výrazný tlak na vytvoření jasně definovaného modifikovaného řešení a postupu pro analýzu a kompenzaci odpružení materiálu v technologiích plošného tváření. [7]

2. Analýza problematiky odpružení

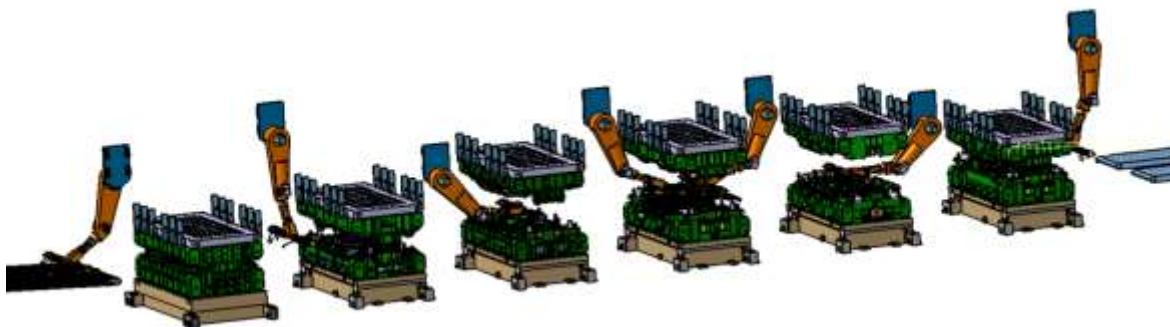
2.1 Technologie lisování

Rozsáhlé množství produktů je v dnešní době vyráběno technologií tváření, kdy je materiál plasticky deformován až do konečné, navržené geometrie výrobku. Jedná se zejména o technologie objemového tváření, válcování, plošného tváření, tažení, ale také stále využívanějšího tváření nepevnými nástroji. Do kategorie plošného tváření se řadí technologie hlubokého tažení, ohýbání, vypínání, lemování či profilování plechu. Tažení plechu je ve většině případů využíváno v operacích, ve kterých je vytvořen hlavní tvar výlisku. V praxi je využíváno různých konvenčních, ale i nekonvenčních technologií tažení, jako např. tažení nepevnými nástroji. Ve velkosériové produkci stále přetrvávají klasické konvenční technologie, tvářením pevnými nástroji viz obr. 2.1.



Obrázek 2.1 – Zobrazení konvenčního lisovací nářadí vlevo v horní úvrati (OTL) a vpravo ve spodní úvrati (UTL).

Během tažného procesu je plechový přístřih vložen do lisovacích nástrojů, v následujícím kroku dojde k uzavírání nástrojů, podobně jak je tomu znázorněno na obr. 2.2 při průchodu plechu lisovací linkou PXL. Po uzavření nástrojů je plech přidržovacím systémem sevřen mezi přidržovací plochu nástroje a matricí. V případě použití brzdících drážek jsou v této fázi vylisovány brzdící drážky do plechu. Funkcí přidržovacího systému je zejména kontrolování pohybu materiálu v nástroji a zabránění vzniku zvlnění a přetahů. Po sevření nástrojů dochází k pohybu činných nástrojů a to buď k pohybu tažníku nebo matrice. Plechový přístřih je v tomto okamžiku postupně deformován a spolu s pohybujícím se činným nástrojem je vtahován do prostoru nástroje. Tento proces probíhá až do dolní úvrati nástrojů UTL (z nj. Untertodlage). Po dosažení nástrojů do dolní úvrati následuje uvolnění působících sil a návrat nástrojů do výchozí polohy OTL (z nj. Oberertodlage).



Obrázek 2.2 – Schéma kinematiky mechanické lisovací linky PXL se servopohonem.

Hlavní výhodou technologie plošného tváření je schopnost vyrábět efektivně při velikých sériích. Nevýhodou je ovšem veliká náchylnost na procesní vady. V automobilovém průmyslu je v současné době kladen velký důraz na výrazný vzhled vozů. Díky tomuto trendu se výroba částí karoserií stává komplikovanější. Trend komplikovaných pohledových oblastí výlisku nekoresponduje s technologičností konstrukce a vyrobiteľností dílů. Navíc, se stálým navyšovaním vyráběného množství dílů, dochází také k typickým vadám životnosti nástroje, které bývají nákladně opravovány. Mezi nejčastější vady, které se objevují v procesu lisování, jsou vyčerpání plasticity materiálu, ztenčení materiálu, zvlnění plechu, tvorba propadu plochy, přetahy hran a odpružení materiálu. Odpružení materiálu, resp. geometrická změna tvaru výlisku, patří k těm více problematickým vadám (příklad odpružení na obr. 2.3).



Obrázek 2.3 – Odpružení dílu A sloupku Daimler v porovnání s referenční geometrií. [8]

2.2 Stávající situace v řešení problematiky odpružení

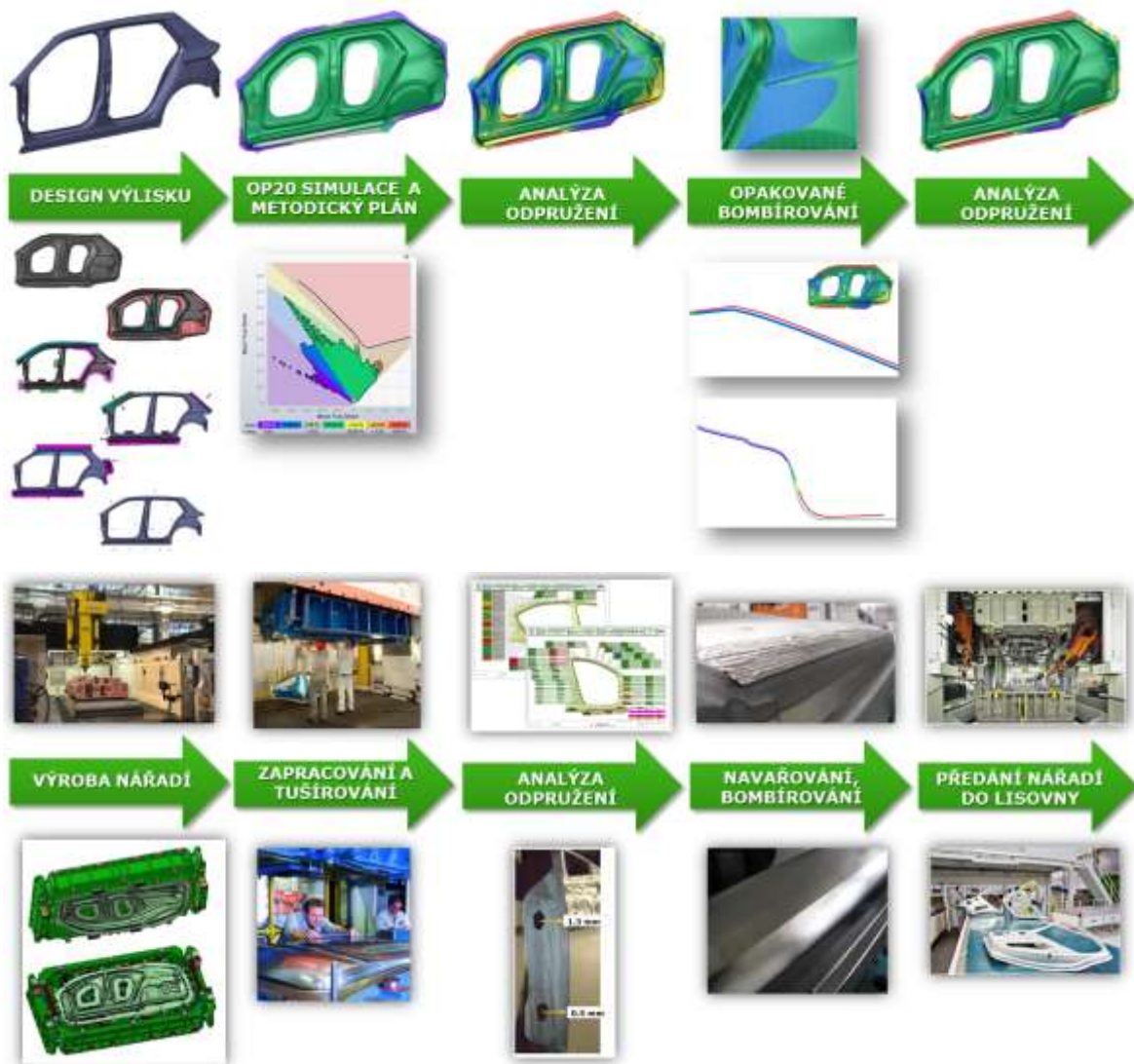
Stávající situace v přístupu řešení k problematice odpružení není z hlediska časových a finančních nákladů příliš příznivá. Obzvláště v době, kdy je kladen velký důraz na postupné a metodické zlepšování všech výrobních procesů za účelem snížení nákladů a zlepšení konečné kvality produktu. I přes to, že první pokus o matematický popis odpružení byl ověřen již v roce 1958 a první výpočetní moduly byly využívány od roku 1991, stále nebyla problematika odpružení dostatečně podrobně popsána a ověřena. [9]

Současný přístup k problematice odpružení není efektivní a to i přes dnes rozšířené možnosti ve využití nových metod a technologií. Jednou z těchto metod je využití analýzy odpružení na základě výpočtu metodou konečných prvků (MKP, resp. anglicky FEM). Na principu této metody jsou postaveny např. programy AutoForm, PAM-STAMP nebo DynaForm. Využití numerických simulací je v dnešní praxi velmi běžné a to i včetně speciálních výpočetních modulů. Co naopak současná praxe postrádá, je ověřená metodika, která by nejen usnadnila návrh lisovacího procesu, ale také výrazně snížila náklady na výrobu lisovacích nástrojů a již tak vysokou zmetkovitost dílů při náběhu nového nářadí. Toto má za následek velmi rozdílné finální časy daných projektů a celkové podoby lisovacího procesu.

2.2.1 Současný přístup k řešení problematiky odpružení v praxi

Současný přístup k řešení problematiky odpružení lze vysvětlit pomocí schématu, který je zobrazen na obr. 2.4. Celý proces metodického plánování začíná vývojem a návrhem 3D modelu daného výlisku v podobě CAD dat (TM díl). Jakmile konstruktér lisovacích nástrojů převezme model daného výlisku, začne pracovat na návrhu metodického plánu lisovacího procesu (tvorba matrice a tažníku, přidržovacích ploch a brzdících drážek, následných střížných a kalibrovacích operací a dalších souvisejících úkonů). V okamžiku, kdy je navržen metodický plán lisovacích operací a nástrojů pro jednotlivé operace, přechází se k ověření procesu pomocí numerických simulací (nastavení parametrů lisovacího procesu, sestavení nástrojů, přidržovací síly, návrh tvaru vstupního plechu, kinematika procesu, apod.).

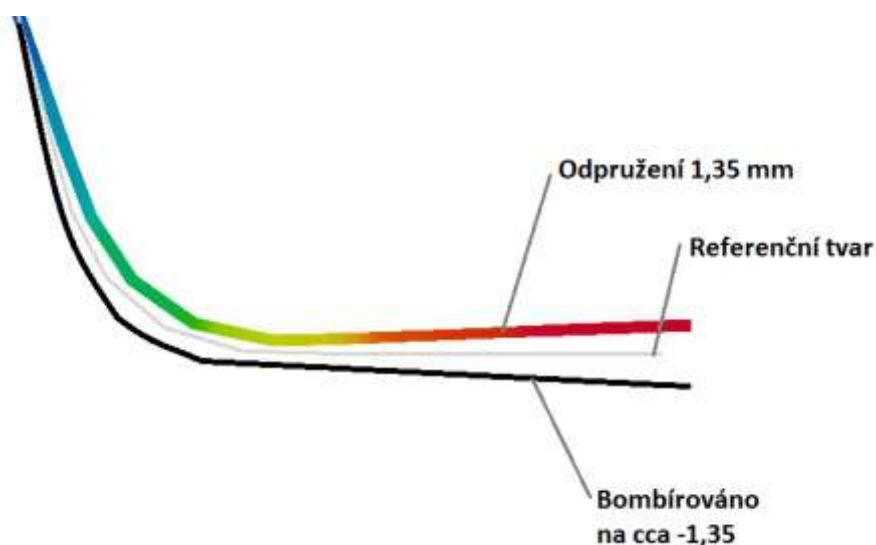
Ve fázi prvních simulačních smyček je hlavním vyhodnocujícím kritériem tvařitelnost materiálu v lisovacím procesu. Cílem je na základě analýzy a opakovaných iterací přivést proces do stavu bezpečné vyrobitelnosti (dostatečné vypnutí plechu, minimální ztenčení plechu, minimum zvlnění, absence trhlin při zachování optimálního ztenčení, bezpečná kinematika, aj.). Až po této fázi následuje řešení geometrické nepřesnosti výlisku s využitím analýzy odpružení v numerické simulaci. Analýza odpružení v numerických simulacích je stále poměrně novou záležitostí a ani samotní developéři programů nemají tyto nástroje plně ověřené na reálných výliscích (přesnost predikce odpružení se pohybuje okolo 60%). [10]



Obrázek 2.4 – Schéma procesu návrhu a výroby lisovacího nářadí s ohledem na odpružení výlišku.

Na základě zjednodušené analýzy odpružení (nejčastěji analýza volného odpružení nebo pomocí zjednodušeného upnutí do upínek) konstruktér přechází k modifikaci geometrie nástroje, v praxi označováno termínem „bombírování“ (plynoucí z metody kompenzace odpružení SF, z angl. „Spring-Forward“ nebo z n.j. „Verschiebungsanpassung“). Jedná se o modifikaci geometrie nástroje na základě předcházející analýzy odpružení (více podrobností na toto téma uvedeno v kapitole 2.8 *Metody kompenzace odpružení úpravou geometrie nástroje*, která popisuje metody kompenzace odpružení). Pokud materiál v určité oblasti odpruží o + 1,5 mm, upraví se v této oblasti geometrie nástroje o cca -1,5 mm (viz rovnice 1 a obr. 2.5). [22]

Tato metoda je efektivně využívána v případě kompenzace odpružení u jednoduchého ohybu. V případě komplexního lisovacího procesu s několika lisovacími operacemi je tato metoda **velmi náročná** (nutnost modelování tvaru s křivostním napojením ploch v pohledové oblasti výlisku) a s **velmi nejasnými a nepřesnými výsledky**.



Obrázek 2.5 – Ukázka principu kompenzace odpružení s využitím bombírované plochy, podobně jako v případě jednoduchého ohybu.

$$x_n = +1,35 \text{ mm} \Rightarrow x_b = -1,35 \text{ mm} \quad (1)$$

Kde x_n představuje velikost odpružení v normálovém směru v daném bodě a hodnota x_b představuje velikost geometrické, „bombírované“ změny tvaru. Tato fáze metodického plánování je nejen časově náročná, ale také velmi komplikovaná. V praxi jsou z tohoto důvodu zavedeny tzv. bombírovací rozhovory, na kterých se schází specialisté výroby lisovacího náradí (metodické plánování, konstrukce, technologie, audit, apod.). Pro dosažení přijatelného odpružení dílu je prováděno opakované bombírování geometrie a následné odzkoušení v numerické simulaci. Navíc, tím že je úprava ploch časově náročná (v případě složitějších dílů trvá korekce 100 – 200 hodin), nebývá vzhledem ke kapacitním možnostem řešena výrobcem výlisku. Tím vznikají dodatečné náklady na projekt.

Bombírování lze poměrně jednoduše aplikovat na krajní oblasti výlisku (viz obr. 2.5), metoda se v těchto místech podobá kompenzaci odpružení u jednoduchého ohybu. V případě úpravy ploch ve středové části výlisku, bývá odpružení jen částečně vyřešeno. Celý proces probíhá v několika zdlouhavých iteracích. V momentě, kdy se velikost odpružení blíží povoleným hodnotám (0,8 mm v technologické a 0,2 mm v designové oblasti), jsou na základě metodického plánu konstruovány sestavy raznic lisovacích nástrojů, kalibrů a klínů a dále jsou vytvořeny obráběcí NCM data, které jsou předány do výroby.

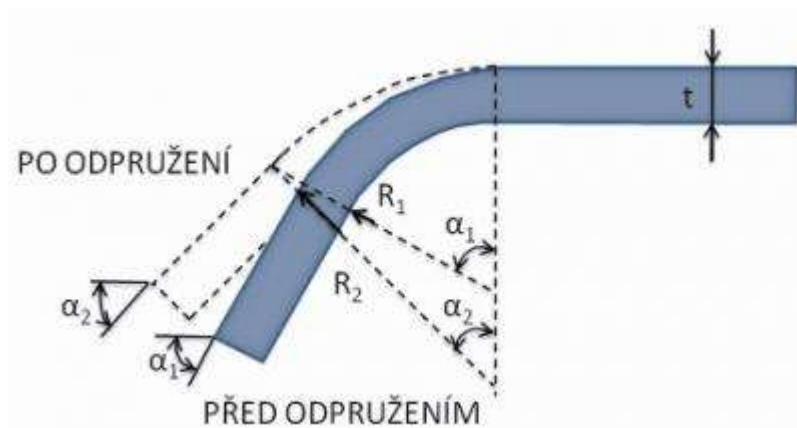
Ve fázi procesu, kdy jsou nástroje obrobena a sestaveny, následuje část výroby, kdy jsou nástroje zapracovávány na jednočinném mechanickém, či hydraulickém lisu. Po této fázi opět následuje analýza odpružení reálného výlisku, kdy je výlisek proměřován na souřadnicovém měřicím stroji. Během měření je výlisek upnut do navržených RPS bodů (více o měření na souřadnicových měřicích strojích a RPS bodech v kapitole 7). Výsledkem je měrový protokol. Na základě záznamu z měření jsou prováděny další dodatečné korekce, které jsou již prováděny na dílně (navaření materiálu a opětovná úprava geometrie nástroje). Současná situace v řešení problematiky odpružení jednoznačně poukazuje na potřebu vytvoření efektivního modifikovaného řešení, resp. metodiky, která bude mít za cíl zpřesnění predikce a zjednodušené řešení následné kompenzace odpružení ještě před náběhem projektu do fáze výroby lisovacího nářadí.

2.3 Obecný popis problematiky odpružení

V okamžiku, kdy je materiál lisován, dochází k deformaci materiálu za působení elastických a plastických deformací. Po ukončení procesu lisování a následného odlehčení výlisku od působících sil, elastické deformace pominou a na konečný tvar výlisku mají vliv pouze plastické deformace. Elastické deformace při své relaxaci způsobují posun materiálu. V případě ohybu se jedná o směr k výchozímu tvaru, u hlubokého tažení se jedná o širší komplexní problém. Takovéto tvarové změny vyvolané elastickou deformací se nazývají odpružení materiálu (z a.j. springback, z n.j. rückfederung). [11]

K trvalému přetvoření materiálu dochází za působení plastických deformací, nedílnou částí plastického přetvoření jsou také elastické deformace. Elastické složky deformace mají po uvolnění působících sil tendenci materiál přetvářet do výchozí polohy. V jaké míře se bude materiál po uvolnění chovat elasticky, ovlivňují materiálové, konstrukční a technologické vlastnosti. Princip odpružení lze vysvětlit na jednoduchém ohybu, viz obr. 2.6. Schéma popisuje ohyb materiálu, následné odlehčené zatížení a konečnou úhlovou změnu ohýbaného materiálu. Z obrázku je patrné, že po odlehčeném zatížení má materiál tendenci se vracet směrem do původní polohy. Konečný úhel ohybu (α_2) je větší než předpokládaný (α_1). Stejně tak mají různou velikost ohybová rádia R_1 a R_2 . Zobrazený příklad odpružení ovšem patří k těm nejjednodušším a v praxi jej není příliš obtížné eliminovat.

Dnes existují ověřené teorie, na jejichž základě lze určit, o jak přesný úhel je potřeba materiál přehnat, aby se následně vrátil do požadovaného úhlu ohybu. V případě technologie tažení nelze tyto závislosti určit tak jednoduše, zejména vzhledem ke složitosti procesu tažení a tvarové složitosti výlisku.



Obrázek 2.6 – Princip vzniku odpružení při jednoduchém ohybu. [11]

2.4 Možnosti v přístupu k problematice odpružení

K problematice odpružení lze přistoupit několika různými způsoby. Odpružení je možné popsat např. pomocí energetického či geometrického modelu. Popis z pohledu energetického modelu se řadí více do fyzikální problematiky. Odpružení je zde možné vyjádřit pomocí uložených energií, které mají za následek následné odpružení materiálu. Geometrický popis se zaměřuje spíše na přímé vyjádření velikosti odpružení s ohledem na napětí a deformaci. V praxi je tento způsob jednodušeji využitelný. Geometrický přístup je podrobněji popsán v následujícím textu.

Pro porozumění vzniku odpružení a jeho chování je nejvhodnější začít s nejjednodušším případem odpružení. Tím je odpružení materiálu v případě jednoduchého ohybu za doplňujících omezujících podmínek, které slouží ke zjednodušení popisu problému. Vzhledem k omezujícím podmínkám procesu ohýbání je ovšem tento popis méně nepřesný a pro reálné procesy prakticky nevyužitelný. K využitelnému popisu problematiky je tedy potřebné zvolit komplexnější přístup. Zde se nabízí řada možných přístupů: [12]

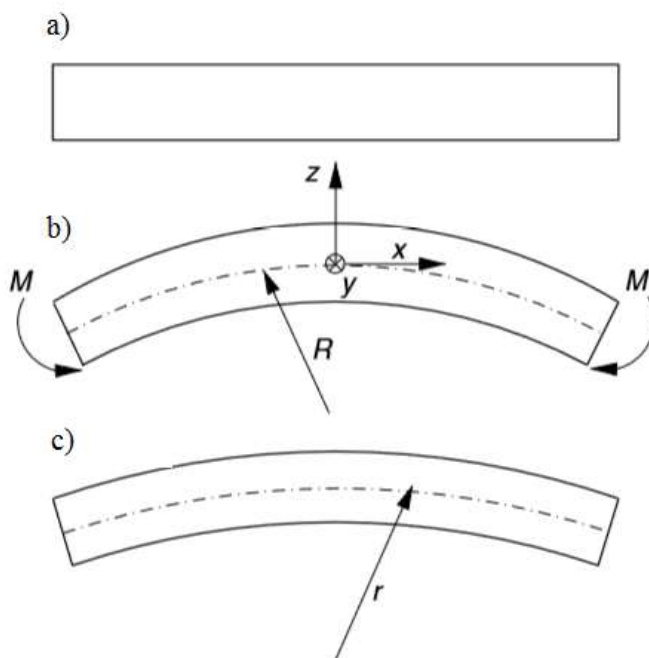
- *Tuhý, ideálně plastický*
- *Elastický, ideálně plastický*
- *Tuhý s deformačním zpevněním*
- *Elasticko plastický*

2.4.1 Odpružení v případě jednoduchého ohybu

Jednoduchým ohybem se rozumí ohyb pod určitým ohybovým momentem při uvažování absence plošného napětí. V tomto případě se jako odpružení předpokládá zpětný elastický ohyb materiálu po následném uvolnění momentové síly.

Předpoklad jednoduchého ohybu pro popis odpružení: [12]

- Bez změny tloušťky materiálu s konstantní křivostí plochy
- Dvou dimenzionální geometrie
- Nevyskytuje se napětí v příčném průřezu, resp. ve směru tloušťky
- Neutrální osa ohybu jako ideálně vycentrovaná
- Izotropní a homogenní materiálové vlastnosti
- Elastická deformace jen v momentě odpružení



Obrázek 2.7 – Schéma odpružení v případě jednoduchého ohybu, a) vstupní plechový materiál o tloušťce t , b) ohyb materiálu do poloměru R , odpružení materiálu do poloměru r , c) změna poloměru ohybu po odpružení. [12]

Přístup k problematice z pohledu jednoduchého ohybu je možné objasnit pomocí obr. 2.7. Vstupní plechový materiál o tloušťce t je ohnut ohybovým momentem M do určitého poloměru R . Po následném uvolnění ohybového momentu dochází vlivem elastické deformace k návratu materiálu do neznámého poloměru r , který se liší od poloměru R . Pro větší zjednodušení problému je předpokládána mnohonásobně větší šířka plechu oproti tloušťce plechu a ohybovému poloměru.

Díky tomuto zjednodušení je možné uvažovat deformaci v šířce jako nulovou. Ohybový moment M lze popsat rovnicí (2).

$$M = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x(\varepsilon_x) z w(z) dz \quad (2)$$

Kde ε_x je deformace po obvodu a σ_x je napětí po obvodu, t a w jsou tloušťka plechu a jeho šířka. Dále předpokládán obdélníkový průřez, tím lze ohybový moment popsat jako moment na jednotku šířky M/w . Díky tomu je možné rovnici (2) zjednodušit a zapsat pomocí rovnice (3).

$$\frac{M}{w} = \int_{-t/2}^{t/2} \sigma_x(\varepsilon_x) z dz = 2 \int_0^{t/2} \sigma_x(\varepsilon_x) z dz \quad (3)$$

V případě takto zjednodušené situace lze předpokládat velmi malé deformace, a tudíž lze tvrdit, že skutečná deformace je rovna deformaci nominální. Je tedy možné zapsat:

$$\varepsilon_x \approx e_x = \frac{z}{R} \quad (4)$$

Po další úpravě rovnice (3) je možné dostat výslednou zjednodušenou rovnici, kde odpružení je popsáno jako poměr mezi navrženým poloměrem R a poloměrem r po odpružení materiálu. Odpružení je popsáno rovnicí (5).

$$\frac{r}{R} = \left[1 - R \frac{M}{EI} \right]^{-1} = \left[1 - R \frac{M/w}{E't^3} \right]^{-1} \quad (5)$$

V případě takového problému se předpokládá, že odpružení materiálu se bude pohybovat směrem k původnímu tvaru. Platí tedy $r > R$. Výsledný poměr r/R bude vždy vyšší než hodnota 1. Na základě zjištěného poměru odpružení r/R je možné dojít k velikosti odpružení konečným přepočtem, který je možné získat rovnicí (6).

$$\frac{r}{R} = \frac{1}{(1 - R \cdot \text{Odpružení})} \quad (6)$$

Takto zjednodušený přístup lze ovšem aplikovat jen teoreticky. V reálném procesu ohýbání je velmi obtížné, spíše nereálné, splnit výše zmíněné podmínky této teorie. V okamžiku, kdy podmínky nejsou splněny, dochází k velmi rozdílným výsledkům předpokládané velikosti odpružení. K problematice odpružení je možné přistoupit také z pohledu komplexnějších metod, které je možné aplikovat na reálné problémy s menšími nepřesnostmi. Další možné přístupy a jejich rozdíly v přesnosti popisují následující kapitoly [12]

2.4.2 Tuhý, ideálně plastický přístup

Tato metoda předpokládá ideálně tuhý materiál, tedy bez elastické deformace. Dalším předpokladem je ideálně plastický materiál bez deformačního zpevnění v průběhu tvářecího procesu. Opět je uvažováno odpružení v rámci jednoduchého ohybu. Na základě těchto podmínek je možné popsat ohybový moment a zároveň i samotné odpružení rovnicí (7).

$$\frac{M}{w} = 2 \int_0^{t/2} \sigma'_0 z dz = \frac{\sigma'_0 t^2}{4} \quad (7)$$

Napětí na mezi kluzu daného materiálu je v této rovnici definováno jako σ_0 . Odpružení je následně možné zjednodušit vyjádřením pomocí ohybových poloměrů před odpružením R a po odpružení r (viz rovnice 7).

$$\frac{R}{r} = 1 - \frac{3\sigma'_0 R}{E't} \quad (8)$$

Pomocí rovnice (8) lze zjednodušeně popsat problematiku odpružení, která oproti rovnici (4) uvažuje základní materiálové vlastnosti a její popis je tak přesnější. Tento přístup je oproti předchozímu již možné aplikovat na reálné případy odpružení v rámci jednoduchého ohybu s relativně dobrou přesností výsledků. [12]

2.4.3 Elastický, ideálně plastický přístup

V rámci dosažení vyšší přesnosti predikce odpružení je uvažováno elastické deformace. V této metodě je již uvažována elastická deformace, materiál již není ideálně tuhý, ale je zde popsáno elastické chování materiálu. Stále zůstává podmínka ideálně plastického materiálu, tedy bez deformačního zpevnění. Elastická deformace má za následek vzniklé napětí v neutrální ose ohybu. Popis ohybového momentu pro elasticko – plastický případ je možné zapsat do rovnice (9). Následně je opět možné přepsat rovnici odpružení do rovnice 10 s pomocí rozdílných poloměrů ohybu R a r .

$$\frac{M}{w} = 2 \int_0^{z^*} \frac{E'z}{R} dz + \int_{z^*}^{t/2} \sigma'_0 z dz = \frac{2E'z^{*3}}{3R} + \frac{\sigma'_0 t^2}{4} - \sigma'_0 z^{*2} \quad (9)$$

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \frac{12M/w}{E't^3} = \frac{12}{E't^3} \left[\frac{\sigma_0'^3 t^2}{4} - \frac{\sigma_0'^3 R^2}{3E'^2} \right] \quad (10)$$

Rovnici (9), která popisuje odpružení v případě elasticko – plastického stavu je možné dále přepsat do alternativní formy, která byla představena *Gardinerem*. Přepis dle *Gardinera* je popsán v rovnici (11) a (12). [12]

$$\frac{R}{r} = 1 - \frac{3\sigma'_0 R}{E't} + \frac{4\sigma_0'^3 R^3}{E'^2 t^3} = 1 - 3x + 4x^3 \quad (11)$$

$$x = \frac{\sigma'_0 R}{E't} \quad (12)$$

Levá strana rovnice (11) je reciproční k poměru odpružení. Rozdíly v jednotlivých přístupech, tedy bez elastické složky deformace a s elastickou složkou deformace je možné vyhodnotit porovnáním rovnice (8) s rovnicí (10). [12]

2.4.4 Elasticko plastický přístup

Popis problematiky odpružení za elasticko – plastických podmínek se řadí do kategorie složitějších přístupů. Důvodem je, že zde není uvažováno žádné zjednodušení problému pomocí omezujících podmínek. Aby bylo možné vyjádřit ohybový moment, nejprve je potřeba vyjádřit deformační zpevnění materiálu v ohybu pomocí derivace. Vyjádřené deformační zpevnění materiálu je popsáno v rovnici (13).

$$\sigma = \sigma_0 + K\varepsilon_p^n \quad (13)$$

V rámci plošného napětí vyjadřuje ε_p přibližnou plastickou deformaci, která je brána jako celková deformace bez elastické deformace do meze kluzu (rovnice 14). Druhá část rovnice (14) je uvedena jako přibližná vzhledem ke konstantní hodnotě elastické deformace do napětí na mezi kluzu.

$$\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e \approx \frac{z - z^*}{R} \quad (14)$$

Ohybový moment je následně možné zapsat jako poměrnou změnu ohybového momentu na šířku plechu (rovnice 15). Po dalším vyjádření rovnice (14) a její úpravě se lze dostat k popisu odpružení, které bere v úvahu deformační zpevnění materiálu (rovnice 16).

$$\frac{\Delta M}{w} = 2 \int_{z^*}^{t/2} K\varepsilon_p^n z dz = \frac{2K}{R^n} \int_{z^*}^{t/2} (z - z^*)^n z dz \quad (15)$$

$$\frac{\Delta M}{w} = \frac{2K}{R^n(n+2)} \left(\frac{t}{2} - z^* \right)^{n+2} + \frac{2Kz^*}{R^n(n+1)} \left(\frac{t}{2} - z^* \right)^{n+1} \quad (16)$$

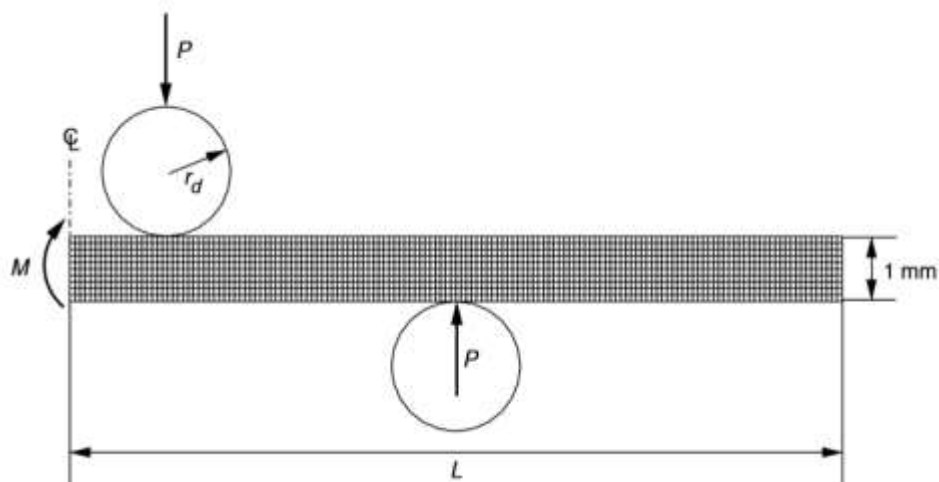
Jako v předchozích případech lze odpružení vyjádřit přepočtem na požadovaný poloměr R a poloměr po odpružení r . Vyjádření je popsáno rovnicí (17), kde poměr M/w je dán rovnicí (16).

$$\frac{1}{R} - \frac{1}{r} = \frac{12M/w}{E't^3} \quad (17)$$

Pomocí rovnice (17) lze dle teorie dosáhnout nejpřesnějšího vyjádření problému odpružení v případě jednoduchého ohybu, jelikož tento přístup bere ohled na nezjednodušené materiálové vlastnosti (elasto – plastické vztahy a deformační zpevnění materiálu). Popsané přístupy se však stále pohybují v oblasti ohybu materiálu. Do dnešní doby stále nebyla podobným způsobem popsána problematika odpružení v případě hlubokého tažení. Její popis je v porovnání s ohybem materiálu mnohonásobně složitější. [12]

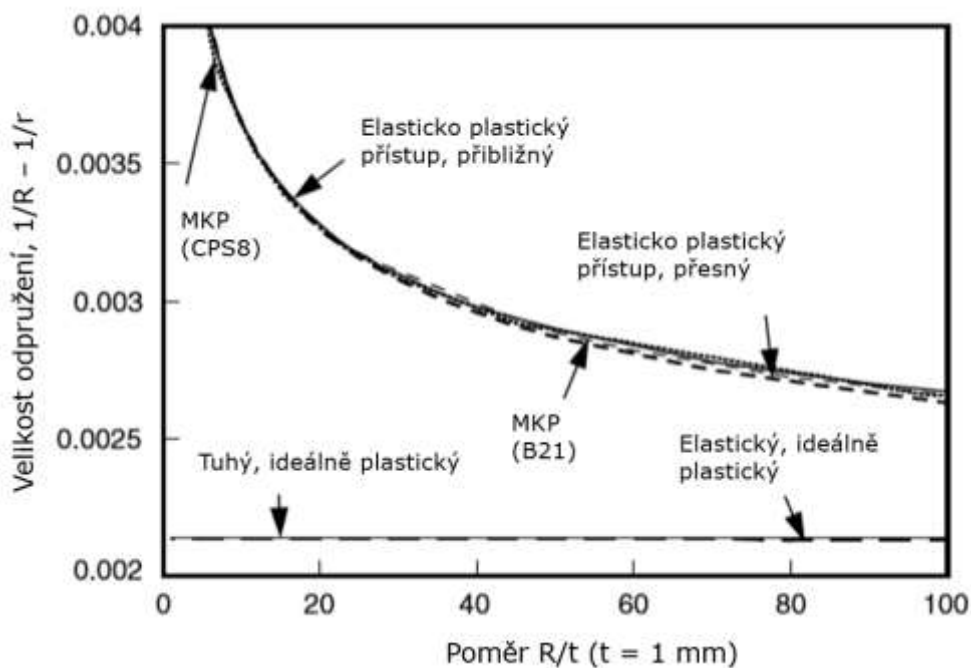
2.4.5 Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení

Z konečného vyjádření rovnic (6, 8, 11 a 16) je na první pohled možné usoudit, že výsledky daného přístupu budou odlišné. Je zřejmé, že např. přístup, který uvažuje materiálové vlastnosti, by měl vykazovat přesnější výsledky oproti zjednodušenému popisu, který místo elastických vlastností uvažuje ideálně tuhý materiál. Pro porovnání jednotlivých přístupů byl proveden experiment jednoduchého ohybu materiálu, ten je zobrazen na obrázku 2.8. Plechový vzorek o tloušťce 1 mm byl ohýbán ohybovým momentem M na požadovaný poloměr R . Vzhledem k tomu, že využití numerických simulací je dnes velmi běžné, byl do porovnání zahrnut výpočet pomocí numerické simulace v programu ABAQUS. Výpočet byl proveden pomocí metody konečných prvků a to na různé nastavení sítě elementů. Pro porovnání bylo vybráno nastavení CPS8 a B21. CPS8 označuje kvadraticky tuhé elementy pro výpočet plošného napětí (z aj. plane stress quadratic solid elements) a B21 označuje paprskové elementy pro výpočet plošného napětí (z aj. plane stress beam elements).

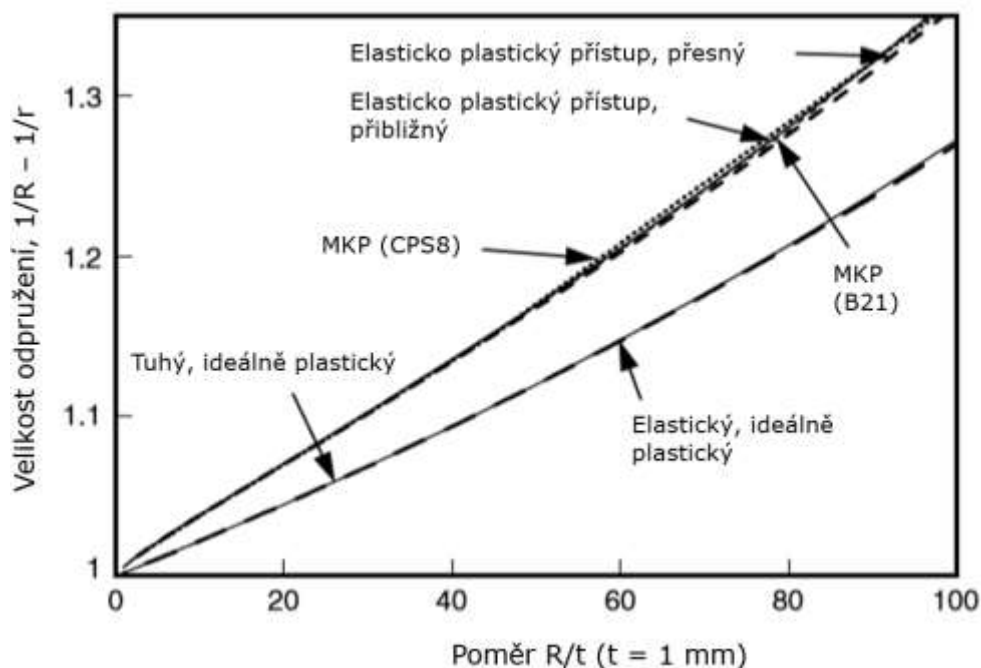


Obrázek 2.8 – Schéma experimentu pro porovnání přístupů k problematice odpružení. [12]

Ze zjištěných hodnot byl sestaven ucelený diagram, který slouží jako porovnání jednotlivých přístupů. Na obr. 2.9 je znázorněno porovnání výsledného odpružení, které je dáno rozdílem poloměrů R a r v závislosti na změně poměru R/t . Na diagramu (obr. 2.10) je znázorněno porovnání odpružení formou poměru r/R v závislosti poměru R/t .



Obrázek 2.9 – Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení v závislosti odpružení na poměru R/t . [12]



Obrázek 2.10 – Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení v závislosti poměrného odpružení r/R na poměru R/t . [12]

Z diagramů zobrazených na obrázku 2.9 a 2.10 vyplývá skutečnost, že většina přístupů k problematice odpružení se od sebe navzájem tolik neliší až na dvě výjimky. Výjimku tvoří zjednodušené metody přístupu k problematice odpružení a to tuhý, ideálně plastický přístup (rovnice 6) a elastický, ideálně plastický přístup (rovnice 8).

Na základě výše popsaných přístupů k popisu problematiky odpružení lze usoudit, že pro přesný popis a predikci odpružení je uvažován maximální popis daného problému, tak jak je v reálném tvářecím procesu. Z pohledu výše popsaných přístupů je potřeba se vyhnout jakémukoliv zjednodušování a omezování popisu. Pro přesný popis je využíváno elasticko-plastického přístupu. Ostatní přístupy vykazují velmi malou přesnost popisu problematiky odpružení. Pro detailnější porovnání těchto metod by bylo zapotřebí provést nový experiment s větší variabilitou ve změně vstupních podmínek. [12]

2.5 Klasifikace představitelů odpružení

Na základě charakteru změny tvaru lze odpružení materiálu rozdělit do kategorií, které se nejčastěji vyskytují v oblasti lisování: [13]

Úhlová změna – nejjednodušší typ odpružení způsobený elastickou deformací po ohybu materiálu.

Natočení boční stěny - zakřivení vytvořené na boční stěně profilu. Příčinou je různorodý napěťový gradient v závislosti na rozdílné tloušťce plechu v průřezu výlisku.

Zkroucení typu „twist“ - vzájemné pootočení dvou příčných řezů. Jedná se především o úhlovou změnu, která se liší v rámci celého výlisku. To má za následek rozdílné zkroucení na jednom a na druhém konci výlisku. Zkroucení vzniká jako následek nevyváženého odpružení a zbytkového pnutí v součásti.

Zkřivení hrany - příčiny vzniku zkřivení hrany jsou podobné jako u natočení (twistu). V tomto případě odpružení nezpůsobuje změnu krouticí moment, ale ohybový moment v kolmé rovině na průřez. Odpružení nastane jako následek rozdílných tažných poměrů na kraji a uprostřed stěn součásti.

Celková změna tvaru - při celkové změně tvaru dochází ke komplexní změně geometrie v celém tvaru součásti. Po odlehčení působících sil dojde ke změně kontaktu mezi výliskem a plochou nástroje a tím dojde ke změně tvaru vůči referenční geometrii.

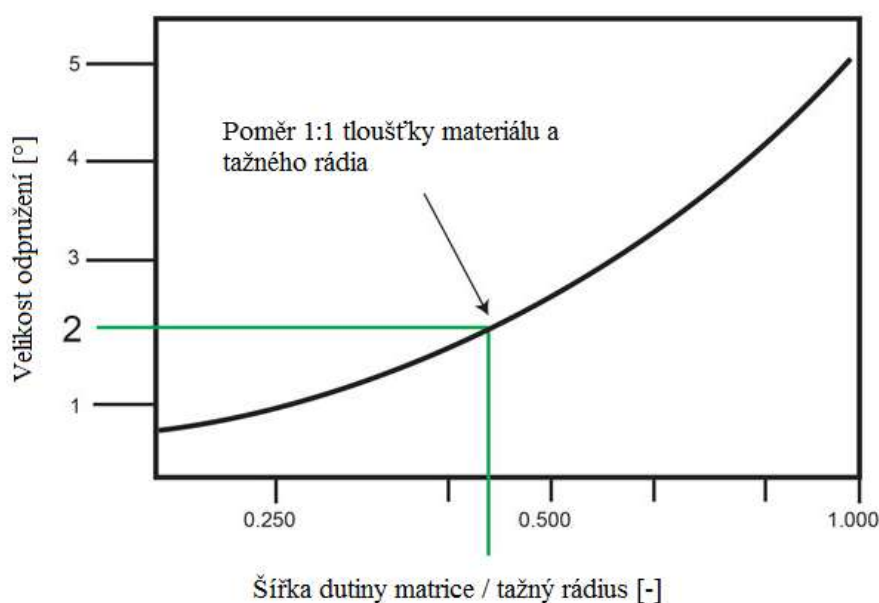
2.6 Analýza okrajových podmínek

V současné době jsou k popisu problematiky odpružení ve výrobních procesech stále častěji využívány numerické simulace. K řešení problému fyzického modelu je tak využíván matematický model numerické simulace. Konečný výrobní proces v praxi ale ovlivňuje řada parametrů a jevů, které se nazývají okrajové podmínky. Okrajové podmínky lze charakterizovat jako materiálové, technologické a konstrukční podmínky. V případě numerických simulací je aplikováno zjednodušení fyzického modelu (okrajových podmínek) za účelem zjednodušení matematického modelu. Dochází tedy ke zjednodušení podmínek teorie plasticity. Jedná se zejména o tyto podmínky: [14]

- *Nepružné plastické deformační zpevnění*
- *Ohyb materiálu předpokládán za podmínek plošné deformace*
- *Zanedbán Bauschingerův efekt a vliv rychlosti deformace*
- *Pro popis plastické anizotropie materiálu je využita Hillova teorie*

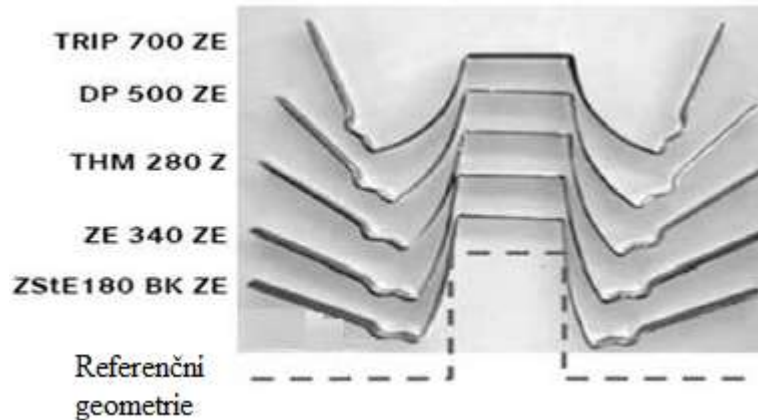
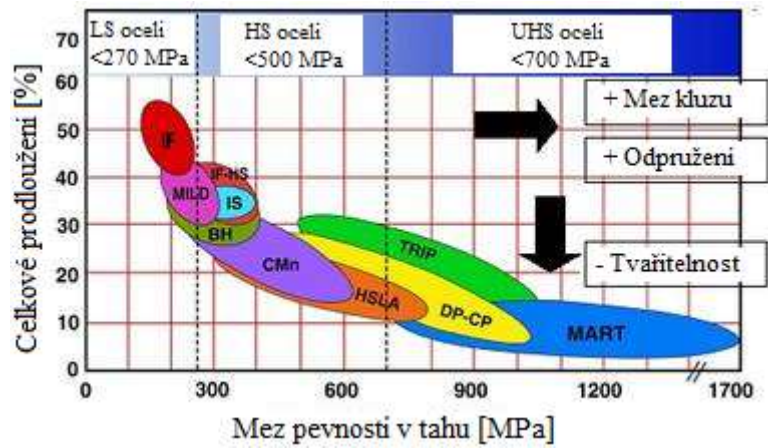
2.6.1 Materiálové podmínky

Do kategorie materiálových podmínek se řadí vlastnosti týkající se daného materiálu. Pro tvářecí procesy jsou zejména důležité mechanické vlastnosti materiálu, mez kluzu R_e , mez pevnosti R_m , tažnost materiálu A , deformační zpevnění a anizotropie. Do materiálových podmínek patří také tloušťka materiálu, která má na lisovací proces zásadní význam. Tloušťka materiálu úzce souvisí s poloměrem tažné hrany (technologická podmínka). V praxi je z toho důvodu využíván poměr R/t . Čím je tento poměr větší, odpružení tím dosahuje větších geometrických změn (viz obrázek 2.11).



Obrázek 2.11 – Závislost poměru R/t na velikosti odpružení u zastudena válcované nízkouhlíkové oceli. [15]

Možností ve výběru materiálů pro karosářské díly v automobilovém průmyslu je dnes mnoho. Vždy záleží na konečné technologičnosti konstrukce dílu. Např. pro povrchové části karoserie se využívají nízkouhlíkové hlubokotažné oceli (DC05, DC06, HX180, HX220, aj.). Dále se dnes běžně využívají mikrolegované oceli, dvoufázové feriticko - martenzitické oceli, oceli s BH efektem, TRIP a TWIP oceli a slitiny neželezných kovů (zejména hliníkové slitiny). Pro speciální výstužné díly, jako např. pro A či B sloupek, je k výrobě využíváno materiálů o vyšších mezích pevnosti, např. TRIP či HSLA. Cílem je zvýšení výsledné tuhosti karoserie. S využitím vysokopevných materiálů dochází k větším geometrickým změnám. Důvodem jsou větší elastická a plastická napětí při stejné deformaci materiálu, tedy větší složka elastické deformace oproti ocelím s nižší pevností. Obrázek 2.12 poukazuje na problematiku vlivu materiálových vlastností na velikost odpružení.



Obrázek 2.12 – Porovnání vlivu použitého materiálu a jeho mechanických vlastností na velikost odpružení v ohybu. [16]

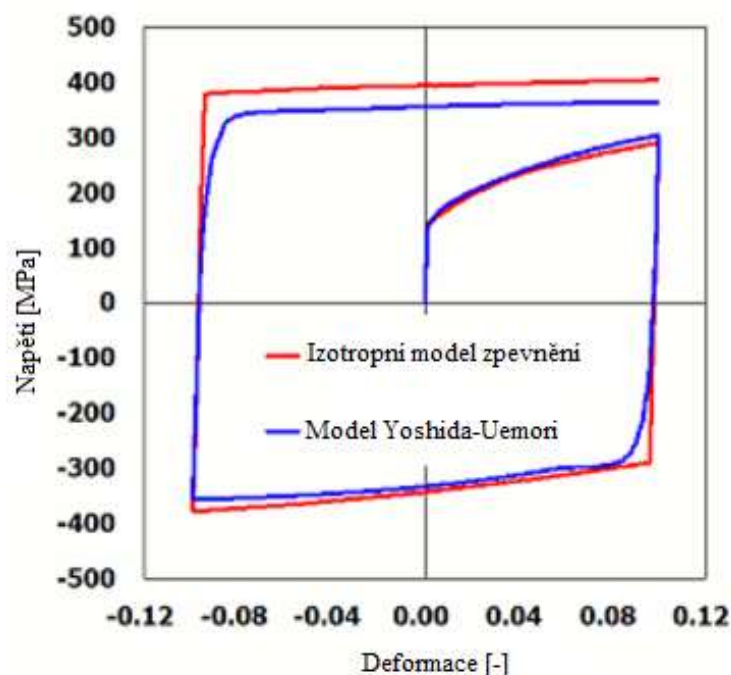
Mimo pevnost materiálu má na odpružení také značný vliv modul pružnosti v tahu E . Z Hookova zákona vyplývá: [46]

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \text{ kde po úpravě } E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (18)$$

Modul pružnosti v tahu E určuje tangentu úhlu směrnice křivky do meze kluzu R_e v tahovém diagramu. Čím větší je tento úhel, tedy čím je větší modul pružnosti v tahu E , tím bude menší podíl odpružení po odlehčeném zatížení. Největší geometrické vady ve smyslu odpružení vykazují části karoserie vyráběné z hliníkových slitin. Pro porovnání, pro hliníkové slitiny $E = 70 \text{ GPa}$, pro konstrukční oceli $E = 210 \text{ GPa}$. [17]

V úvodu do kapitoly 2.6 *Analýza okrajových podmínek* byla zmíněna problematika zjednodušení okrajových podmínek plastické deformace. Jedním z parametrů, který úzce souvisí s přesností matematického modelu a tedy i s přesností predikce odpružení v numerických simulacích, je parametr deformačního zpevnění materiálu. Jeho popis bývá velmi často v numerické simulaci zjednodušován. K deformačnímu zpevnění dochází v případě, kdy je materiál plasticky deformován za studena, resp. pod teplotou rekrystalizace.

Nejčastěji se lze setkat se třemi typy zpevnění materiálu, s **izotropním**, **kinematickým** a jejich **kombinací** (Yoshida – Uemori model). K popisu problematiky deformačního zpevnění přispěli nejvíce F. Yoshida a T. Uemori se svým komplexním modelem pro přesnější popis deformačního zpevnění (viz obr. 2.13). [18]

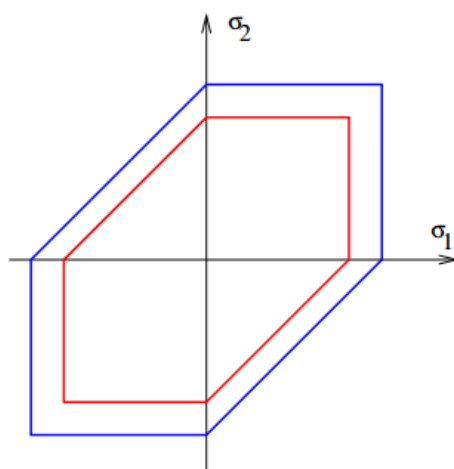


Obrázek 2.13 – Zpřesnění popisu deformačního zpevnění u kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [19]

- **Izotropní model** - velikost následných podmínek se proporcionálně zvětšuje, tyto podmínky plasticity dále nemění svoji polohu (obr. 2.14).

Kde křivka napětí má charakter:

$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij}) - K = 0 \quad (19)$$

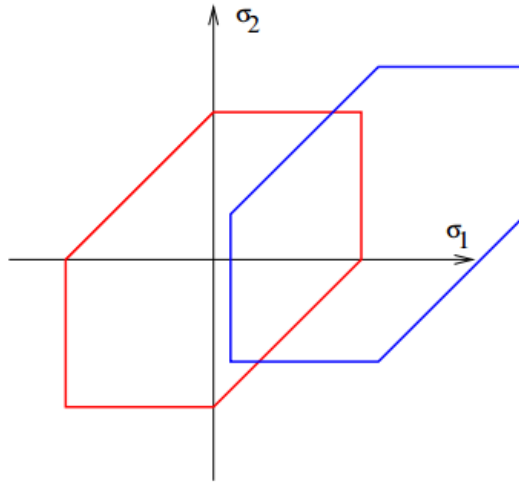


Obrázek 2.14 – Schéma izotropního zpevnění materiálu. [18]

- **Kinematický model** – následné podmínky plasticity mění polohu, ale jejich tvar a velikost jsou shodné s (počáteční) podmínkou plasticity (obr. 2.15).

Kde křivka napětí má charakter:

$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = 0 \quad (20)$$

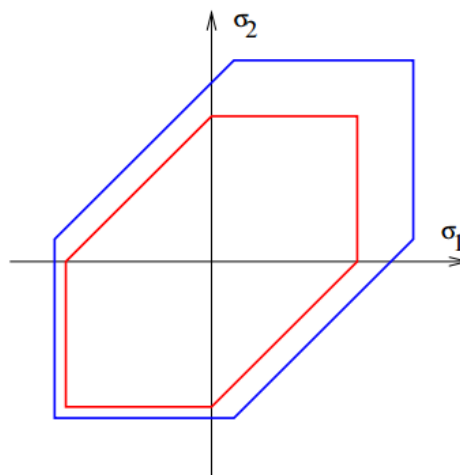


Obrázek 2.15 – Schéma kinematického zpevnění materiálu. [18]

- **Kombinovaný Yoshida – Uemori model** - následné podmínky plasticity mění polohu a současně se proporcionálně zvětšují. Popis nejvíce odpovídá chováním skutečných látek (obr. 2.16).

Kde křivka napětí má charakter:

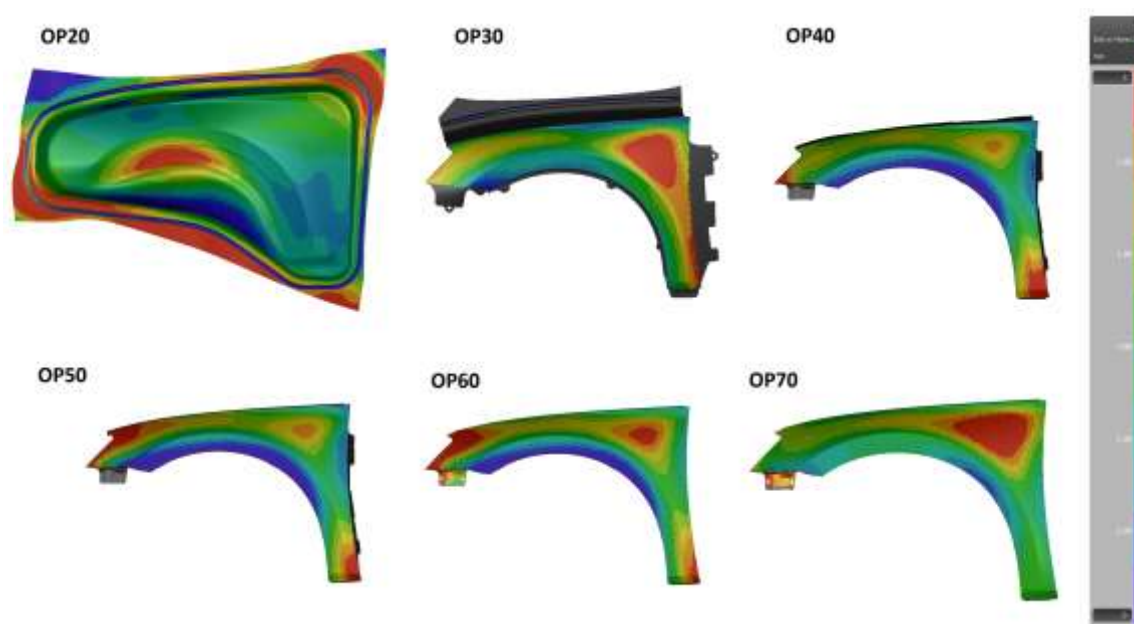
$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - K = 0 \quad (21)$$



Obrázek 2.16 – Schéma kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [18]

2.6.2 Konstrukční podmínky

Mezi konstrukční podmínky patří zejména parametry, které souvisí přímo s technologičností konstrukce výlisku. Nejvíce ovlivňuje odpružení tvarová složitost výlisku. Na základě tvarové složitosti výlisku se velmi liší komplexnost lisovacího procesu. Nejčastěji je lisovací proces rozvržen do dvou a více operací, v případě velmi složitých tvarových konstrukcí se využívá dodatečných operací, např. kalibrování stojin klínem mimo směr lisovací operace. Právě následné operace mají na odpružení výrazný vliv. Při špatně navržených technologických podmínkách v kalibrovací operaci (špatně uzavřené, resp. zapracované nástroje) může dojít k výraznému zhoršení odpružení. Příkladem jsou různé výsledky analýzy odpružení po jednotlivých lisovacích operacích na obr. 2.17.



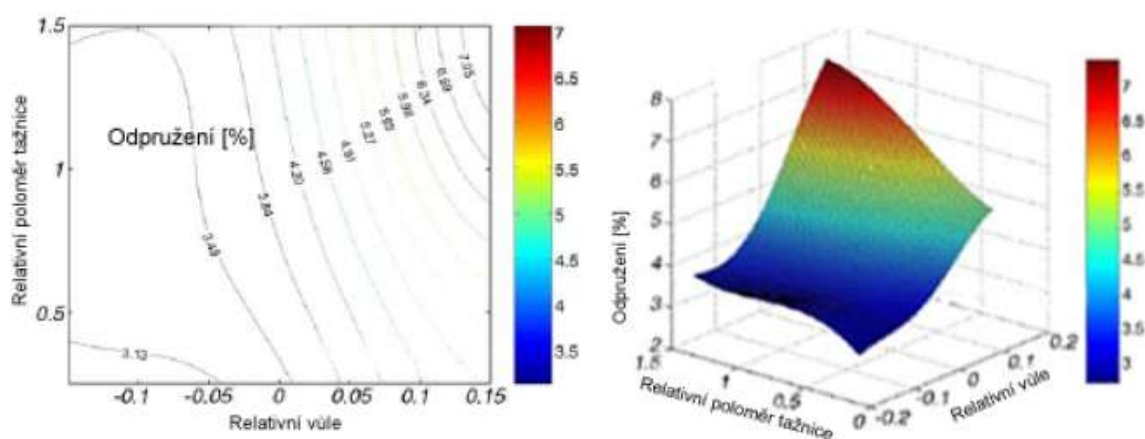
Obrázek 2.17 – Změna charakteru odpružení v závislosti na lisovacích operacích
(Díl blatníku ŠKODA Superb III).

Konstrukcí výlisku lze částečně ovlivňovat výslednou velikost odpružení. Odpružení v těchto případech je ovšem spíše zablokováno, než eliminováno. Nejčastěji se využívají speciální prolisy, díky kterým má výlisek větší tuhost a zabraňuje se tak samovolná geometrická změna tvaru. Dále lze využít vhodně zvolených prostřihů. Obecně k většímu odpružení inklinují otevřené výlisky oproti uzavřeným, kde u uzavřených výlisků odpružení nedosahuje takové energie, aby proběhla geometrická změna tvaru.

2.6.3 Technologické podmínky

Pod technologickými podmínkami je možné si představit všechny parametry týkající se lisovacího procesu. Mezi hlavní a nejčastěji označované podmínky patří kinematika procesu, velikost lisovací a přidržovací síly, vůle v nástrojích, velikost tažných poloměrů, tvaru brzdících drážek, tvar kalibrovací vložky, aj. Lisovací proces ovlivňují i méně často uváděné podmínky, jednou z nich je rychlost deformace a její průběh. Rychlost deformace lze definovat jako velikost přetvoření za jednotku času. Zjednodušeně lze říci, že se zvyšující se rychlostí deformace se zhoršuje tvařitelnost materiálu a naopak. Další technologické podmínky, které ovlivňují lisovací proces v menší míře, jsou velikost zdvihu, doba pro setrvání v úvrati, počet činných částí stroje atd. Na obr. 2.18 je znázorněno porovnání vlivu relativního poloměru tažnice a vůle mezi nástroji na velikost odpružení při hlubokém tažení. Odpružení dosahuje vyšších hodnot, pokud je větší poloměr tažnice a vůle v nástrojích.

Další proměnná, která výrazně ovlivňuje lisovací proces, je parametr tření. Tření je během lisovacího procesu možné ovlivnit pomocí maziv nebo drsností nástroje, či plechu. Třením je možné ovlivňovat tok materiálu v nástrojích. Větším třením lze pohyb materiálu znemožňovat, čímž dochází k většímu přetvoření materiálu nebo naopak lze v případě lokálního přimazání tok materiálu usnadňovat.



Obrázek 2.18 – Porovnání vlivu technologických podmínek na velikost odpružení. [11]

Podobně jako u brzdících drážek, odpružení vykazuje menších geometrických změn v případě, že je materiál více přetvořen. Materiál by tak měl být ideálně přetvořen na minimálně 3% ztenčení své původní tloušťky. [11]

2.7 Možnosti eliminace odpružení

V praxi se využívají různé metody k eliminaci nebo alespoň k částečnému ovlivnění vzniku odpružení. Dříve byly geometrické změny tvaru kompenzovány na základě zkušeností technologů a konstruktérů. Většina metod znamenala výrazný zásah do lisovaného dílu, čemuž je v dnešní době tendence se vyhnout, zejména pokud jde o vnější pohledové výlisky. Ke kompenzaci odpružení se tak dnes přistupuje lehce odlišným způsobem. Řešení problematiky odpružení se přesunulo k metodickým plánovačům lisovacího nářadí. Tyto zásahy jsou prováděny ještě v předvýrobní fázi lisovacích nástrojů. Je snaha odpružení kompenzovat zásahem nejprve do podmínek lisovacího procesu a až následně do geometrie vlastního dílu. K tomuto řešení problematiky se stále častěji využívají numerické simulace. Následující kapitoly popisují nejběžněji využívané metody kompenzace odpružení v praxi.

2.7.1 Eliminace odpružení úpravou lisovacích nástrojů

Dodržení vůle lisovacích nástrojů – doporučuje se dodržovat co nejmenší možnou vůli mezi lisovacími nástroji. Menší vůle způsobuje výrazně větší maximální napětí na povrchu výlisku. Tím se také snižuje podíl elastické deformaci, která výrazně ovlivňuje vznik odpružení. V praxi se lze v některých lokálních případech setkat i se sevřením nástrojů na menší výšku než je samotná tloušťka plechu. [11]

Úprava přidržovací síly (tlaku) – přidržovací sílu je možné upravit pomocí přidržovacího systému (např. pomocí plynových pružin). Jedná se o část nástroje, který slouží k sevření plechu mezi nástroji. Hlavním důvodem využití přidržovacího systému je zamezení vzniku zvlnění plechu a zajištění kontrolovatelného vtahu plechu do nástrojů. Přidržovacím systémem je možné také ovlivnit velikost odpružení. Podle teorie, čím větší přidržovací síla, tím dochází k většímu podílu napětí v plechu a tím k menšímu odpružení. [20]

Úprava geometrie nástroje – úpravou se rozumí zejména snaha tvářet s menším tažným rádiem na matici v závislosti na tloušťce lisovaného materiálu, jedná se o poměr R/t . V případě materiálu AHSS se doporučuje poměr R/t nižší než u běžných HSS. Dále se např. u ohybových operací využívá přehnaného úhlu α , kdy se materiál následně odpruží zpět do požadovaného úhlu.

Volba dodatečné lisovací operace – jednou z dodatečných operací, díky které je možnost snížit vznik odpružení, je dodatečná operace kalibrování. Po vylisování dílu následuje kalibrovací operace, při které dochází ke všestrannému tlaku na výlisek. Výlisek si již pamatuje tento nový stav deformace a neměl by se dále vracet do prvotního tvaru nebo se jinak deformovat. Obdobným způsobem lze využít v dodatečné operaci technologii vypínání. Na dodatečné operace není často v lisovací lince místo, zároveň náklady spojené s další výrobou lisovacího nářadí prodražují výrobu.

2.7.2 Eliminace odpružení úpravou výlisku

Vhodná technologičnost konstrukce výlisku – již ve fázi vývoje dílu by se měla provádět podrobná analýza vyrobiteľnosti, bohužel v automobilovém průmyslu má současně vývoj oproti výrobě navrch. Příkladem je trend ostrých pohledových linií na vozech (tornádo linie), jejichž výroba je velmi komplikovaná. V těchto oblastech má materiál tendenci se ztenčovat, tím dochází ke zmenšení lokální tuhosti a materiál v těchto oblastech pruží. Dále má materiál tendenci se propadat v blízkosti těchto ostrých hran a to v závislosti na směru přetahu.

Propady jsou speciální formou odpružení, kdy dochází k propadu materiálu v řádech desetin až setin milimetru. Na čistém výlisku je velmi obtížné tyto vady vizuálně zahlédnout. Problém ovšem nastává až po aplikaci barvy a laku, kdy jsou tato místa velmi viditelná díky světelnému lomu. Z pohledu odpružení se tak doporučuje jít naproti dnešním trendům.

Zvýšení tuhosti výlisku – zvýšení tuhosti výlisku se využívá zejména v kritických oblastech, kde odpružení dosahuje největších hodnot. Nepochází tak úplně k eliminaci odpružení, ale díky zvýšené tuhosti výlisku je zamezeno materiálu se pružit (odpružení nemá takovou energii, aby překonalo tuhost výlisku v dané oblasti). Ke zvýšení tuhosti výlisku se využívá speciálních výstužných prolisů (obr. 2.19) nebo prostřihy v bočních hranách. Zvýšení tuhosti se využívá hlavně v případě, kdy dochází k odpružení natočením stěny. Nevýhodou metody je, že se již zasahuje do konečného tvaru výlisku a je potřeba brát ohled na funkční, estetické a montážní hledisko. Prolisy ke zvýšení tuhosti musí být vždy v šedivé zóně (zóna, která je po zamontování dílu do karoserie vozu skryta).



Zpevňující prolisy ke
zlepšení tuhosti dílu

Obrázek 2.19 – Ukázka zpevňujících prolisů ke zlepšení tuhosti dílu na blatníku vozu ŠKODA Superb.

Volba vhodného materiálu – volbou vhodného materiálu lze výrazně ovlivnit vznik a velikost odpružení. V dnešní době lze na trhu najít materiály s velmi rozdílnými vlastnostmi, z pohledu odpružení vhodnými i méně vhodnými. Dle okrajových podmínek lisovacího procesu je v zásadě vhodnější využívat materiály s menší mezí pevnosti, ale naopak s větší tvařitelností. Z pohledu odpružení je výhodnější využití nízkouhlíkových ocelí, např. DC01-05, HX180-220. Naopak výšepevné a vysokopevné materiály jsou z pohledu konečné tvarové přesnosti neoptimální, jedná se např. o materiály DP500, HSLA a HX320.

Dalším současným trendem v automobilovém průmyslu (příkladem je Land Rover Range Rover, BMW 5, Audi Q3, aj) je stále větší využití hliníkových slitin. I přes nízkou pevnost hliníku a velmi dobrou tvařitelnost, má hliníková slitina velikou náchylnost k odpružení. Za tím stojí průběh křivky v tahovém diagramu vzhledem k nízkému modulu pružnosti E . Podíl elastické složky deformace je tak mnohonásobně větší oproti běžně používaným nízkouhlíkovým ocelím. [21]

2.7.3 Ostatní možnosti eliminace odpružení

Žihání – dodatečné operace tepelného zpracování, konkrétně žihání, snižuje velikost odpružení. Ke snížení odpružení dochází díky dodatečné relaxaci materiálu po proběhlé předchozí deformaci. Velmi často se tato metoda využívá u vysokopevnostních ocelí, u kterých dochází ke vzniku odpružení často až po delší době.

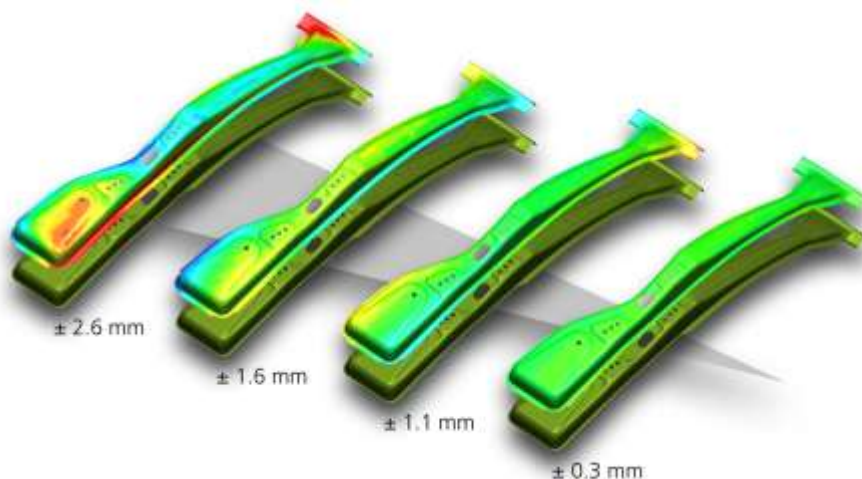
2.8 Metody kompenzace odpružení úpravou geometrie nástroje

Kompenzací odpružení se rozumí modifikace originální geometrie tvářecích nástrojů, za účelem snížení tvarové odlišnosti mezi cílovou geometrií a reálnou geometrií výlisku. V literatuře bylo popsáno již několik metod kompenzace odpružení, nejpoužívanějšími metodami jsou metody: [22]

- **SF** – zpětná kompenzace odpružení (z aj. Spring Forward)
- **DA** – kompenzace odpružení úpravou geometrie (z aj. Displacement Adjustment)
- **HI** – iterační na základě absence přesného algoritmu (z aj. Heuristic Iterative)

Nejvýhodnější metodou pro kompenzaci odpružení je metoda **DA**, jelikož ji lze aplikovat na všechny operace v tvářecím procesu. Metodu **SF** je možné aplikovat jen na první tažnou operaci, jelikož výpočetní model počítá se silovými hodnotami na tažníku na konci tažného procesu. [22]

Metoda **HI** je principem velmi podobná metodě **DA**, avšak metoda **HI** k výpočtu kompenzované geometrie využívá heuristický modul (přibližné řešení bez přesného algoritmu). Naopak výhodou metody **HI** je, že k výpočtu není potřeba parametrizovaného modelu. V rámci dizertační práce je k numerickým výpočtům využíván program AutoForm, který ve svém výpočtovém modulu Compensator využívá metodu kompenzace **DA**, ta je podrobněji popsána v kapitole 2.8.1. [23], [24]



Obrázek 2.20 – Aplikace modulu Compensator z důvodu snížení odpružení u B sloupku. [25]

AutoForm Compensator umožňuje kontrolovaně modifikovat výrobek a plochy nástrojů na základě analýzy odpružení provedené v numerické simulaci lisovacího procesu. Při práci s kompenzačním modulem je potřeba vhodně zvolit kritéria kompenzace.

Jedná se především o volbu strategie kompenzace, výběr kompenzovaných a přechodových ploch, faktoru vyhlazení, aj. Na obrázku 2.20 je zobrazena postupná kompenzace ve třech iteračních smyčkách dílu B sloupku s využitím speciálního kompenzačního modulu. Využití speciálních výpočtových modulů je přínosné zejména v předvýrobní fázi, kdy je ještě možné jakkoliv zasahovat do geometrie nástrojů. [26]

2.8.1 Podrobný popis kompenzační metody „DA – Displacement Adjustment“

Princip metody DA spočívá v posunutí uzlů výpočetní sítě nástroje ve směru opačném, než je směr odpružení. Princip metody DA lze zapsat jako rovnicí (22). [22]

$$c = t + a(s - t) \quad (22)$$

Kde hodnota c označuje velikost kompenzace daného uzlu výpočetní sítě nástroje. Parametr t , s určuje aktuální pozici materiálu po analýze odpružení. Parametr a vyjadřuje příslušný kompenzační faktor. Kompenzační faktor je stanoven na základě zkušeností a individuálního přístupu ke konkrétnímu případu. Nejčastěji se pohybuje $a = -1$ až $-2,5$. Pro přesnější kompenzaci odpružení byla vyvinuta upravená metoda SDA (Smooth Displacement Adjustment), kterou lze zapsat rovnicí (23).

$$c(x) = x + au(x) \quad (23)$$

Kde $c(x)$ označuje hodnotu kompenzované geometrie a hodnota a opět vyjadřuje kompenzační koeficient. Parametr x označuje bod na geometrii, který bude deformován, resp. kompenzován. Parametr $u(x)$ popisuje pole SDA (vyhlazené kompenzace) pro všechny body v třídímním prostoru (v celé geometrii nástroje).

Tento parametr tak nahrazuje a aproximuje diskrétní pole $(s-t)$ z rovnice (22). Úkol je nyní najít hodnotu $u(x)$ ve které bude

$$u \approx s - t \quad (24)$$

odpovídat všem diskrétním bodům t . To znamená, že pole pro SDA se bude lišit jen minimálně od diskrétního pole DA. Dále je nezbytné nalézt pole posunu u , které minimalizuje rovnici (25).

$$\|(s - t) - u\|_{L_2} \quad (25)$$

Deformace, která je způsobena odpružením, je převážně elastického deformačního charakteru a jedná se tedy o relativně hladkou deformaci. Prostor diskrétního pole posunu každé komponenty může tak být nezávisle aproximován pomocí polynomu nízkého řádu (26).

$$u(x, y, z) = \sum a_i p_i(x, y, z) \quad (26)$$

Kde vektor a obsahuje váhu polynomů a oba vektory u a a jsou vektory ve třídímním prostoru. Při dosazení rovnice (26) do rovnice (25) dostaneme po dodatečné variaci lineární soustavu rovnic (27) s maticemi (28).

$$\sum_i m_{ij} a_i = r_j \quad (27)$$

$$m_{ij} = \int_G p_i p_j dx \quad (28)$$

Kde parametr G určuje oblast integrace, která vyjadřuje cílovou geometrii kompenzace nástroje. Numerická integrace je postupně provedena sumarizací pro celou plochu kompenzované geometrie. Pravá strana r je dána komponentami diskrétního pole posunu ($s-t$). Každá komponenta r_j je definována rovnicí (29).

$$r_j = \int_G (s-t) p_j dx \quad (29)$$

Nepřesnost metody kompenzace SF se pohybuje do 10%, velmi ovšem záleží na zkušenostech při volbě koeficientů. Je potřeba také zmínit, že čtenou roli na konečné nepřesnosti metod kompenzace hraje samotný výpočet a správnost analýzy odpružení. [23]

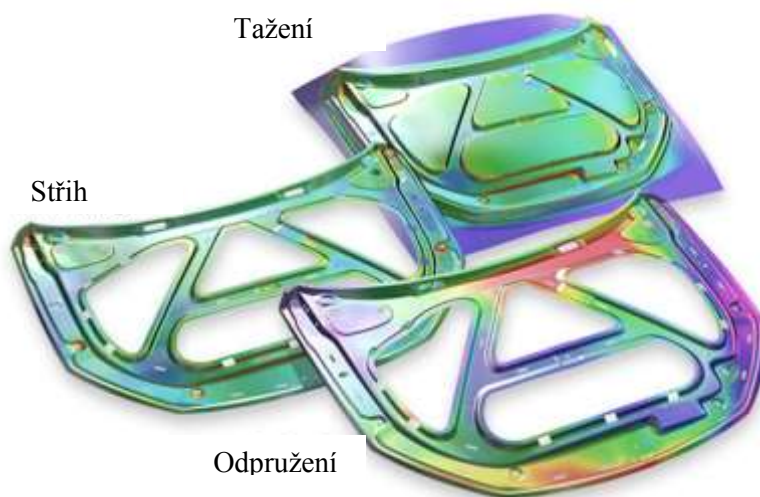
Nevýhodou všech metod kompenzace geometrie nástroje je výsledná hladkost plochy kompenzované geometrie. Jelikož v rámci kompenzace probíhá výpočet lokálního posunu, resp. kompenzace sítě oproti původní poloze, dochází k narušení ploch nástroje. V některých případech je velmi těžké daný nástroj po výrobě zapracovat. Z toho důvodu se kompenzace nedoporučuje aplikovat na přidržovací plochy nástrojů, jinak by bylo velmi obtížné dosáhnout dokonalého zapracování při „tuširování“ nástrojů. [22], [27]

3. Numerické simulace

3.1 Úvod do numerických simulací

Dříve, než došlo k rozvoji výpočetní techniky, se k výpočtu návrhu technologických procesů využívaly rovnice popsané různými autory, ty zjednodušeně popisovaly podmínky daných technologických procesů. V případě jednoduchých výrobních procesů se často využívaly dříve ověřené postupy na základě zkušeností v dané oblasti. Pokud šlo o empirické výpočty, jejich výsledky se často lišily, takže poskytovaly pouze nadhled k dané technologii. Často šlo jen o předběžné návrhy pomocí postupného dosazování tabulkových hodnot do empirických vztahů.

Dnes se k návrhu lisovacích procesů běžně využívají numerické simulace, které urychlují a zejména zkvalitňují konečný produkt. Numerické simulace zažily svůj největší rozvoj v 90. letech minulého století společně s rozvojem výpočetní techniky. Na základě vstupních parametrů dávají uživateli možnost přesně sledovat a analyzovat výrobní proces ještě v předvýrobní etapě výrobního procesu. V případě tváření lze tak například sledovat vtažení přístříhu plechu mezi tažník a matici, dále chování materiálu v následných střížných a kalibrovacích operacích. K vyhodnocení procesu je možné využít řadu analýz, např. průběh napětí, zpevnění materiálu, ztenčení plechu, analýzu křivosti ploch, odpružení materiálu a mnoho dalších (viz obr. 3.1).



Obrázek 3.1 – Analýza numerické simulace lisovacího procesu vnitřní kapoty automobilu. [28]

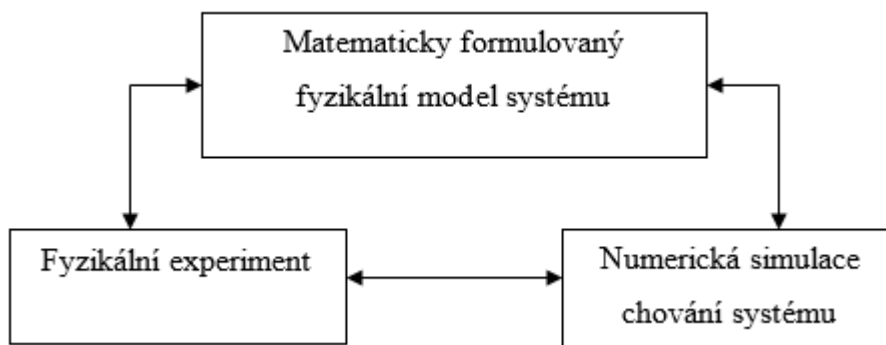
V případě nevyhovujících výsledků lze vstupní parametry změnit a upravit výrobní proces a to vše v předvýrobní etapě bez dodatečných zásahů do nástrojů. V minulosti byla fáze korekcí nástrojů a výrobního procesu velice nákladná, jelikož ke korekcím docházelo až ve fázi zpracování nástrojů (dnes je tomu stále tak, ale v mnohem menším měřítku). Numerické simulace i přes své výhody mají jednu velikou nevýhodu, kterou je pořizovací a udržovací cena licencí, která je pro řadu menších podniků rozhodující (jedna výpočetní licence se pohybuje v řádech desítek tisíců eur ročně).

Při výpočtu napětí a deformace u tvářeného tělesa má na výsledek rozhodující vliv správná volba metody řešení tohoto problému. Ve vztahu k dané tvářecí operaci je třeba volit tu metodu výpočtu, která se svými předpoklady a zjednodušeními co nejvíce blíží skutečnosti. Z důvodu značné složitosti celého procesu tváření se teoretický výpočet často liší od skutečnosti. Jedna z nejčastěji používaných metod výpočtu je metoda řešení diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity. Nejčastěji se jako základní modul numerické simulace využívá metoda konečných prvků (dále jen MKP). Dalšími méně používanými moduly jsou např. metoda sítí, Ritzova metoda, Galerkinova metoda, metoda konečných objemů, aj. Počítačová simulace představuje výrazné usnadnění a zkvalitnění předvýrobních etap, avšak oproti dřívějším výpočetním metodám se jedná o podstatně složitější proces výpočtu. Numerické simulace pracují se známými fyzikálními zákony, jako jsou klasické teorie pružnosti a pevnosti, plasticity, teorie z oblasti přenosu tepla a materiálových věd. Vyškolení zkušeného výpočtáře numerických simulací v konkrétním oboru je v dnešní době náročné. Většinou trvá několik let, než se výpočtář plně zaškolí v práci s daným programem. [29], [30]

3.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (často se vyskytuje pod heslem FEM z angl. „finite element method“) je numerická metoda vyvinutá v 50. letech minulého století, která slouží k řešení rozsáhlých inženýrských problémů. Na vývoji této metody se podílela řada autorů, např. Clough, Turner a Martin. Nejprve byla využívána v oblastech jako je letectví, kosmonautika, lodní průmysl, až později se její využití přesunulo i do menších odvětví. [31]

Dnes lze díky rozvoji výpočetní techniky tuto metodu využívat na prakticky jakékoliv výpočetní stanici. Schéma na obr. 3.2 objasňuje souvislost mezi fyzikálním a matematickým modelováním fyzického experimentu s využitím numerické simulace.



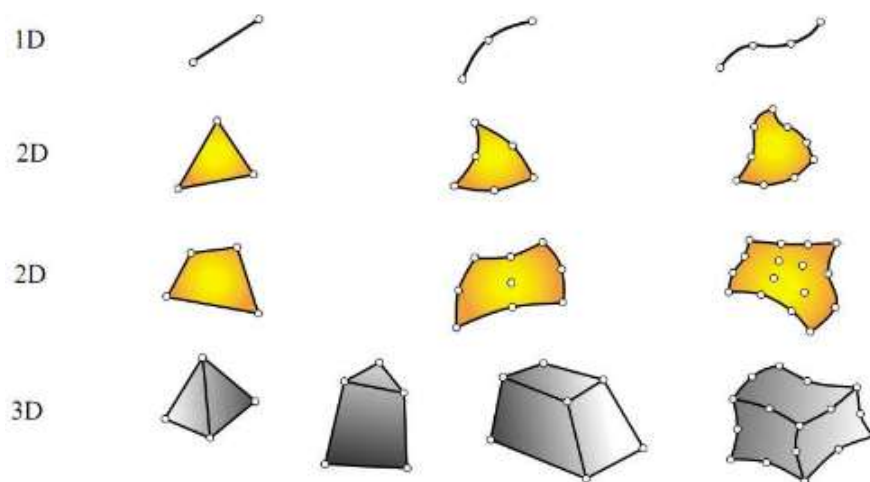
Obrázek 3.2 – Souvislosti fyzikálního a matematického modelování s fyzikálním experimentem.

[30]

Základním stavebním kamenem metody MKP je prvek, resp. element konečných rozměrů. Na rozdíl od pohledu klasické pružnosti, která vychází z představy rovnováhy na nekonečně malém elementu. Principem je rozdělení dané součásti na konečný počet podoblastí a vytvořit síť skládající se z konečných prvků. Pro každý typ elementu je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž jsou hledány neznámé parametry řešení (např. posuvy a natočení, z kterých dále počítáme napětí atd.). [31]

Základním krokem při aplikaci metody konečných prvků, je rozdělení součásti na jednotlivé elementy (konečný počet podoblastí). Pro výpočet nejpoužívanější jsou zobrazeny na obr. 3.3. Spojná místa elementů, tzv. uzly, s sebou nesou informaci o souřadnicích uzlu. Souřadnice uzlů představují tvar a polohu elementu. Elementy lze rozdělit podle použitého zatížení. [31]

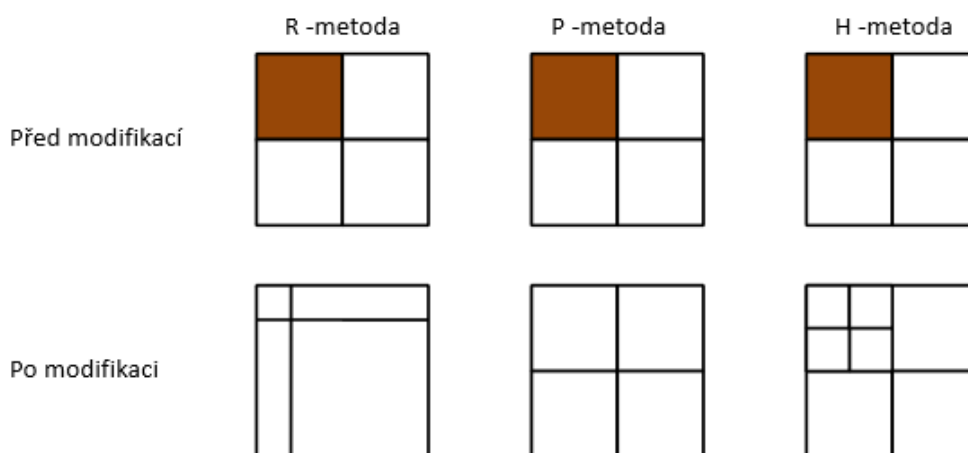
- **Liniové elementy** – elementem je úsečka (ROD, BEAM), využití pro řešení problémů tyčí a nosníků
- **Plošné elementy** – elementem je membrána (MEMBRANE) či skořepina (SHELL), použití pro řešení plošného problému, např. plošné tváření plechu s malou tloušťkou
- **Objemové elementy** – elementem je prostorový model typu SOLID, využití pro např. objemové tváření, či plošné tváření plechů větších tloušťek



Obrázek 3.3 – Příklady nejpoužívanějších typů elementů pro řešení různých problémů. [31]

3.2.1 Popis použití MKP v numerických simulacích

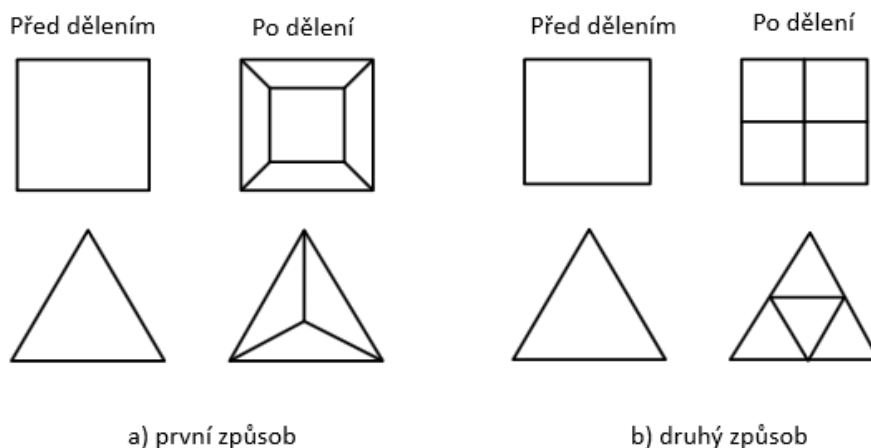
Většina dnešních numerických simulací probíhá na výpočtu fyzického problému s pomocí adaptivních technik, resp. **adaptivní sítě**. Adaptivní síť je založena na automatické modifikaci výpočetní sítě v průběhu výpočtu. Jedná se o automatickou analýzu prvotních výsledků s následnou modifikací sítě. Lze se setkat s několika metodami, které vedou ke zpřesnění výpočtu, kterými jsou R – metoda, P – metoda a H – metoda. Nejpoužívanější metodou je **H – metoda**, která je spolu s ostatními metodami zobrazena na obr. 3.4.



Obrázek 3.4 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [32]

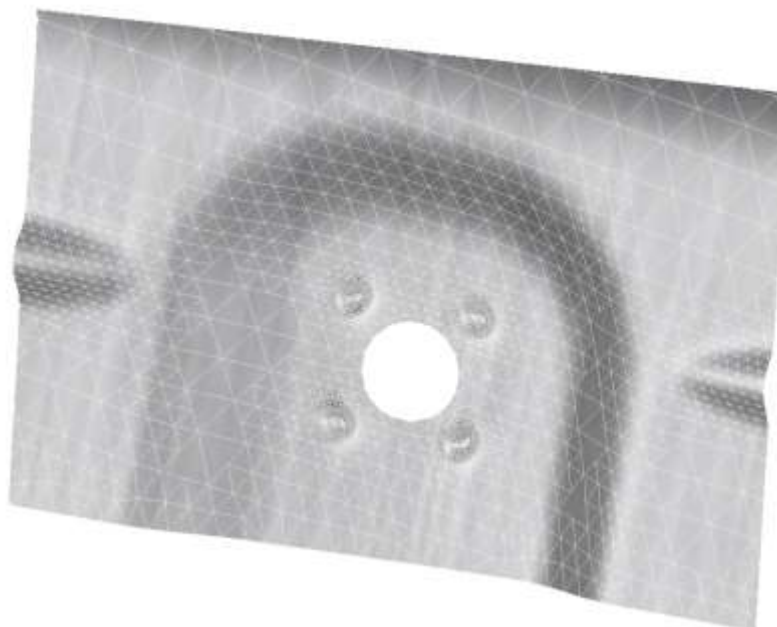
H – metoda spočívá v navyšování počtu elementů a uzlů při zachování stejného typu elementu. Při každé modifikaci počtu uzlů dochází k charakteristickému zmenšení rozměru elementu. Pokud jsou následně splněny potřebné podmínky konvergence, výsledky konvergují k přesnějšímu řešení.

K modifikaci sítě dochází změnou velikosti elementu a to jak globálně, tak lokálně. Např. při tažení plechu dojde k automatické modifikaci sítě v oblasti brzdících drážek, tažných poloměrů, ostrých hran, apod. H – metodu modifikace sítě je možné dále dělit na metodu, která nezachovává původní tvar elementu (a) a na metodu, která zachovává původní tvar elementu (b), viz obrázek 3.5. [32]



Obrázek 3.5 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [32]

Na obrázku 3.6 je znázorněna automatická modifikace adaptivní sítě v oblasti výztužného prolisu (blatník vozu ŠKODA Superb). V této oblasti je během numerické simulace podrobněji počítán napěťo – deformační stav a je tak provedena lokální modifikaci sítě.



Obrázek 3.6 – Ukázka automatické modifikace adaptivní sítě v oblasti výztužného prolisu.

Samotný výpočet numerické simulace je ve většině případů opřen o teorii implicitního řešení. Integrace implicitního řešení je založena na statické rovnováze, dynamické síly jsou tedy ignorovány. Následující rovnice je ve výpočtu řešena po diskretizaci sítě. [32], [49]

$${}^{t+\Delta t} R - {}^{t+\Delta t} P = 0 \quad (30)$$

$$R(\hat{u}) - P(\hat{u}) + K(\hat{u}) \cdot \Delta(\hat{u}) = 0 \quad (31)$$

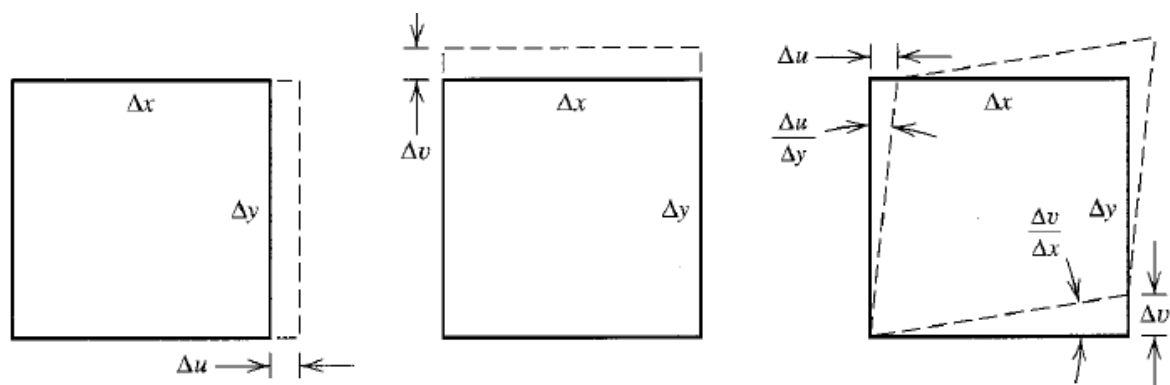
Kde R představuje vnitřní síly a P vnější síly. Statické vyrovnání sítě je řešeno v čase $t + \Delta t$. Posuv elementu následně popisuje parametr u .

3.2.2 Možnosti ve výběru výpočtového elementu

K řešení fyzického problému v numerické simulaci je možné využít různé typy elementů, s kterými souvisí také samotný výpočet, jeho přesnost a opakovatelnost. V oblasti plošného tváření se lze setkat nejčastěji s membránovými (z angl. membrane), skořepinovými (z angl. shell) a 3D elementy (z angl. solid). Dále se lze setkat s upravenými typy těchto elementů, jejichž použitelnost nebyla stále ověřena a z toho důvodu jsou k výpočtu využívány méně.

MEMBRANE – napětí v membránovém elementu je vztaženo k posunu podle následujících diferenciálních rovnic: [33]

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (32)$$

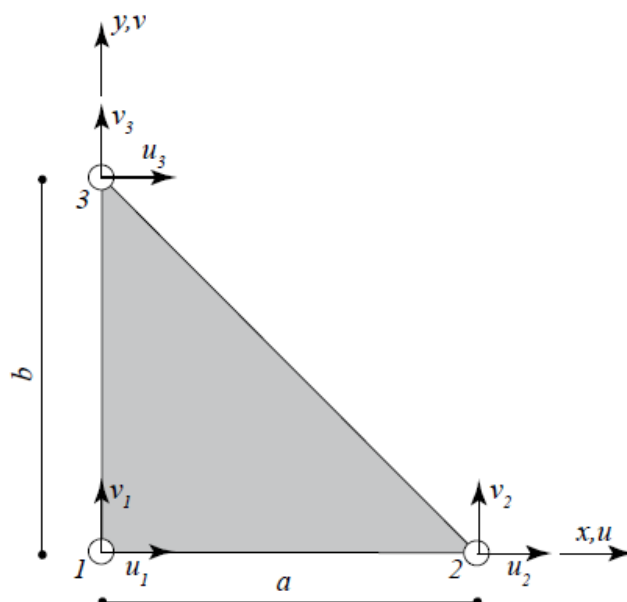


Obrázek 3.7 – Grafické vysvětlení posuvu v závislosti na napětí v membránovém elementu. [33]

Pro výpočet lze využít trojúhelníkové či čtvercové elementy (tak, jak je zobrazeno na obr. 3.7) a to buď s elementy s jednoduchým popisem (tří či čtyř uzlové elementy) nebo s podrobným popisem (šesti či devíti uzlové elementy).

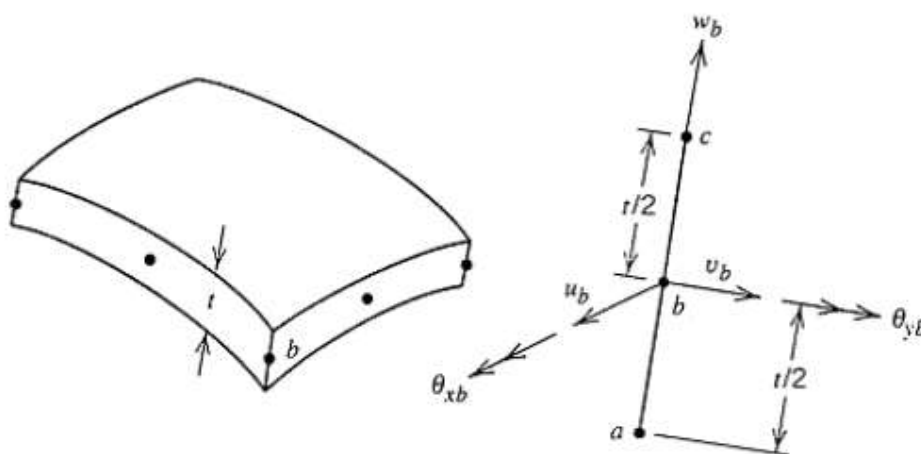
Např. program AutoForm využívá tři uzlový trojúhelníkový membránový element, který má 2 stupně volnosti v každém uzlu. Každý element má tedy 6 uzlových neznámých (popis pomocí obr. 3.8 a rovnice 33).

$$\begin{aligned} u(x, y) &= \beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y \\ v(x, y) &= \beta_4 + \beta_5 \cdot x + \beta_6 \cdot y \end{aligned} \quad (33)$$



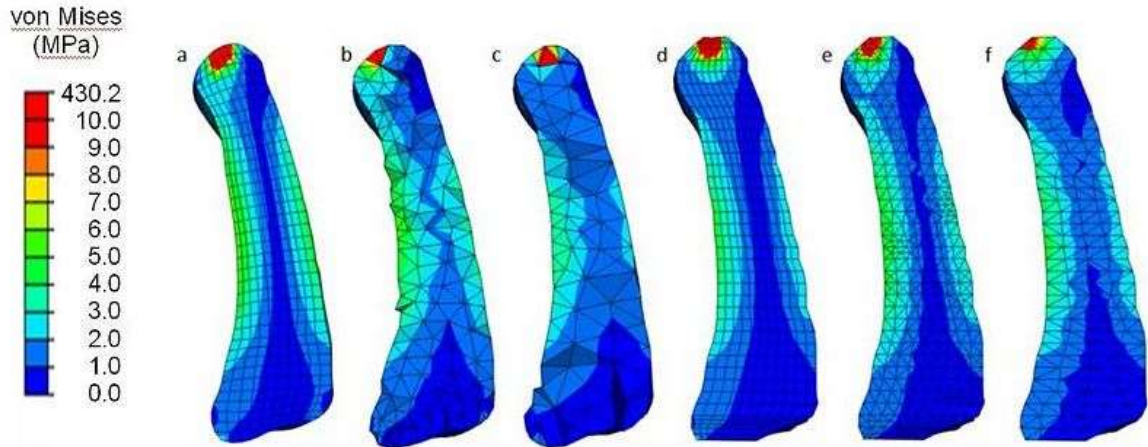
Obrázek 3.8 – Tři uzlový trojúhelníkový element typu membrány. [33]

SHELL – geometrie skořepinového elementu je definována její tloušťkou a střední plochou. Uzlový bod skořepinového elementu má 5 stupňů volnosti (3 translační směrem ke 2 tangenciálním a k normálovému vektoru, 2 rotační s tangenciálními vektory jako osami rotace). Nejběžnějším způsobem, jak získat skořepinový element, je kombinací membránového (membrane element) a ohybového elementu (bending element). Takto lze jednoduše dosáhnout quadrilaterálního elementu (Q4), který je znázorněn na obr. 3.9. [33]



Obrázek 3.9 – Zakřivený skořepinový (shell) element. [33]

SOLID – jedná se o 3D elementy, které jsou neomezené co do možnosti tvaru, zatížení, materiálových vlastností a hraničních parametrů. Důsledkem této neomezenosti je, že musí být počítáno se všemi 6 napětími (tři normálové a tři tangenciální). Typickými 3D elementy konečno prvkové sítě jsou např. tetrahedra či hexahedra elementy (obr. 3.10). [33]



Obrázek 3.10 – rozdíl v zasítování mezi tetrahedra quadratickým a hexahedra quadratickým elementem, sekvence a) až f) vyjadřují výšku úvratě kovádel. [34]

I přes to, že 3D Solid elementy mohou být využity v prakticky každé oblasti s velmi vysokou přesností výsledků, jejich využití není vždy tak jednoduché. 3D Solid elementy jsou nejsložitější a velmi zdouhavé na přípravu a na kontrolu chyb sítě a hlavně nejvíce náročné z pohledu HW nároků a výpočetních časů. [33]

Rovnice (35) a (36) popisují řešení problému pomocí deformace. Pokud se všechny rovnice sloučí do jedné skupiny jako vektor, lze řešení problému zapsat jako:

$$\{\varepsilon\} = \{B\} \cdot \{U\} \quad (34)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x}, \quad \varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (35)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y}, \quad \gamma_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \quad (36)$$

Většina 3D elementů jsou přímým rozšířením plošných elementů. Rozšíření se skládá z přidání dalšího bodu v prostoru. Chování, ale také omezení specifických 3D elementů koreluje s 2D elementy, na základě kterých byly rozšířeny. [33]

4. Cíle dizertační práce

Vzhledem ke složitosti lisovacích procesů a k ne zcela objasněnému vlivu působících faktorů na vznik odpružení, je pozornost dizertační práce věnována možnostem ve využití numerických simulací při návrhu lisovacího procesu. Motivací dizertační práce je objasnění problematiky vzniku odpružení, analýzy a její následné kompenzaci v oblasti lisování velkoplošných karosářských dílů. Dizertační práce se věnuje popisu, přesnosti a možnostem ve využití numerických simulací v oblasti lisovacích procesů, konkrétně při řešení problematiky odpružení velkoplošných karosářských výlisků.

Hlavním cílem dizertační práce je **návrh modifikovaného řešení současného přístupu k problematice odpružení**. V rámci modifikovaného řešení bude navržena metodika analýzy a kompenzace odpružení s využitím numerických simulací. Hlavního cíle práce bude dosaženo pomocí následujících dílčích cílů práce:

- 1. Objasnění problematiky vzniku odpružení** – návrh a aplikace vlastních experimentů na základě hypotéz, které byly zjištěny v teoretické části dizertační práce. Cílem je hlubší objasnění problematiky odpružení (podmínky ovlivňující vznik odpružení, matematický popis odpružení, analýza okrajových podmínek lisovacího procesu a jejich vlivu na vznik odpružení, aj.).
- 2. Ověření modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení** – aplikace bude provedena na dílech ze skutečného lisovacího procesu o různé technologičnosti konstrukce. K ověření budou sloužit výsledky měrových protokolů a naskenované geometrie výlisků.
- 3. Porovnání současného a modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení** – v závěrečné fázi dizertační práce bude provedeno ověření navržené metodiky, zejména z pohledu využitelnosti v praxi. Výsledky navržené metodiky budou porovnávány se současným přístupem k problematice odpružení.

K řešení dílčích cílů dizertační práce budou použity díly vozů ŠKODA a SEAT. Vytipování dílů bude probíhat na základě rozdílné úrovně složitosti technologičnosti konstrukce. Cílem je ověřit aplikovatelnost navržené metodiky na různě komplikované lisovací procesy. Navržená metodika by měla mít výrazné pozitivní dopady na náklady a účinnost výroby lisovacího nářadí. Dále by měla mít navržená metodiky pozitivní dopad na celkovou rozměrovou přesnost výlisků. Řešení a diskuse dílčích částí dizertační práce jsou popsány v následujících kapitolách.

5. Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely

V rámci dizertační práce byla řešena řada dílčích experimentů, které sloužily jako podklady pro návrh konečné metodiky. Byla provedena analýza velkoplošných vnějších a vnitřních částí karoserie a na základě jejich tvarové složitosti a složitosti lisovacího procesu byly díly rozděleny **do třech hlavních kategorií**: [P11]

- 1. Kategorie** – díly s nejmenší tvarovou složitostí (např. vnější spodní pásé dveře)
Do této kategorie patří tvarově méně složité díly, v jejichž lisovacím procesu nedochází ke kalibraci tvaru klínem v následných operacích, díly 1. kategorie jsou vždy symetrické, lisovací proces bez dotvarování klínem mimo směr lisovací operace (osa Z).
- 2. Kategorie** – díly s větší tvarovou složitostí (vnitřní pásé nebo boční dveře)
Jedná se o díly s větším množstvím speciálních prolisů v pohledových a šedých zónách dílu, obsahují jednoduché kalibrovací operace (kalibrace vložkou ve směru lisovací operace), vesměs se jedná stále o symetrické díly, lisovací proces bez dotvarování klínem mimo směr lisovací operace (osa Z).
- 3. Kategorie** – díly s komplikovanou tvarovou složitostí (blatník či postranice)
Kategorie s díly, které jsou ve výrobě problematické vzhledem k nesymetrickému tvaru a celkové tvarové složitosti, obsahují veliké množství pohledových prvků, na které jsou při konečné kontrole kladeny vysoké požadavky (např. tornádo linie, špička na přední straně blatníku u výkroje světla, aj.), lisovací proces včetně dotvarování klínem natočeným oproti ose Z.

V současné praxi je velmi obtížné dosažení přesného výsledku v predikci a analýze odpružení a to i u jednoduchých výlisků. Z tohoto důvodu se doporučuje problematikou zabývat postupně, tedy z počátku se vyhnout tvarově velmi složitým dílům, např. postranicím. Důvodem je, že do lisovacího procesu tak vstupuje velké množství faktorů, které ovlivňují jev odpružení.

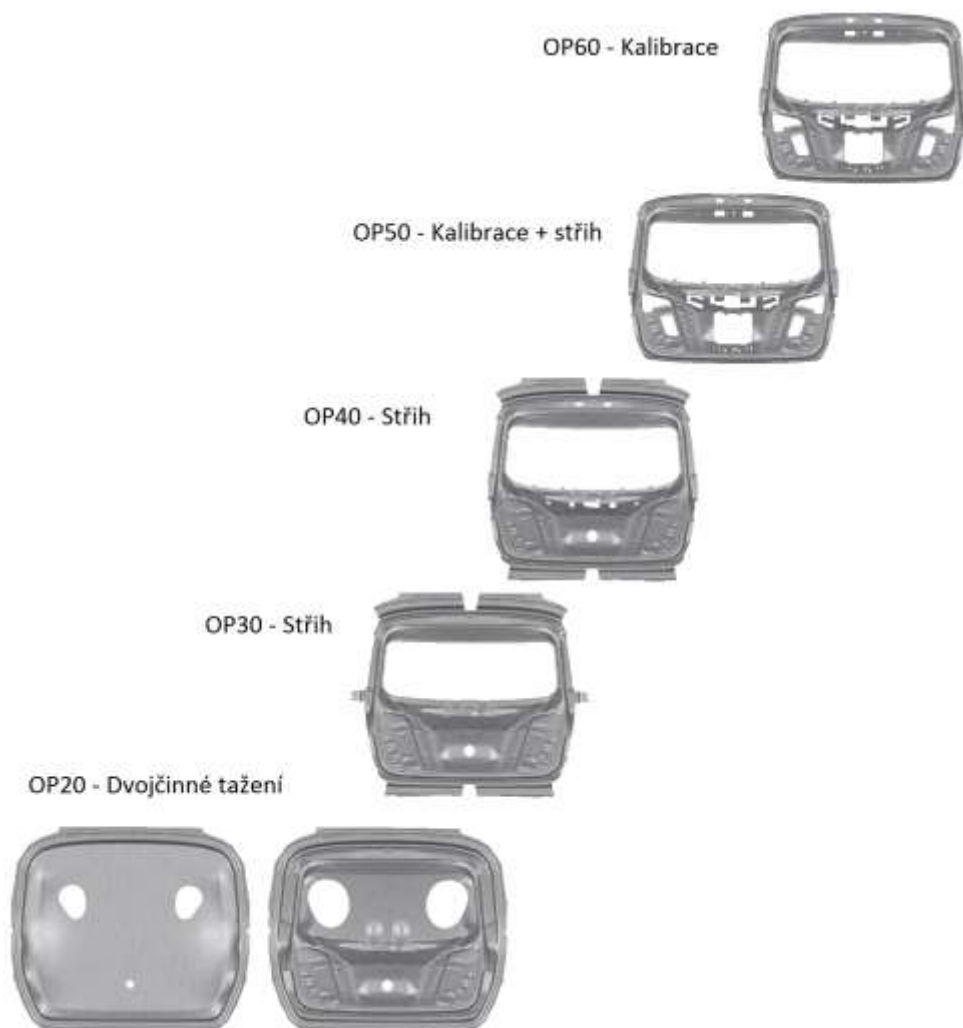
Pro účely výzkumu v rámci dizertační práce byly vybrány **představitelé každé kategorie výlisků**. Jako **první díl**, který se řadí do 1. kategorie, byl vybrán díl vnějších spodních pátých dveří (HKau) vozu **SEAT Ateca**. Metodický plán lisovacího procesu pro díl HKau je složen ze čtyř lisovacích operací (obr. 5.1).



Obrázek 5.1 – Sled lisovacích operací dílu vnějších pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P11]

Díl spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca bylo možné využít, jelikož je vzhledem k vzájemné kooperaci v rámci koncernu Volkswagen Group tento vůz vyráběn společností ŠKODA AUTO, a to ve výrobním závodě v Kvasinách. Lisovací nářadí pro tento díl bylo vyráběno v nářadovně ŠKODA AUTO.

Jako představitel druhé kategorie byl vybrán **druhý díl**, vnitřní páté dveře (HKi) vozu **SEAT Ateca**. Metodický plán spolu s ilustrací dílu na voze je zobrazen na obr. 5.2. Oproti předchozímu dílu HKau se jedná o díl s větší tvarovou složitostí, s kterou souvisí komplexnější proces lisování. Lisovací proces se v tomto případě skládá ze šesti lisovacích operací (včetně vstupní střižné operace OP10). Díly vnitřních pátých dveří jsou ve většině případů taženy pomocí dvojčinného tažení (rozdílná kinematika smykadla s tažníkem a smykadla s přidržovacím systémem).



Obrázek 5.2 – Sled lisovacích operací dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P11]



Obrázek 5.3 – Sled lisovacích operací dílu vnějšího blatníku vozu ŠKODA Superb. [P11]

Jako **třetí díl**, který se řadí do 3. kategorie, byl vybrán vnější blatník (KFL) vozu **ŠKODA Superb** (obr. 5.3). Lisovací proces pro tento díl je výrazně složitější než u předchozího dílu. Důvodem je větší tvarová složitost, která vede ke složitějšímu lisovacímu procesu s dvěma kalibrovacími operacemi a s tvářením klínem v poslední operaci.

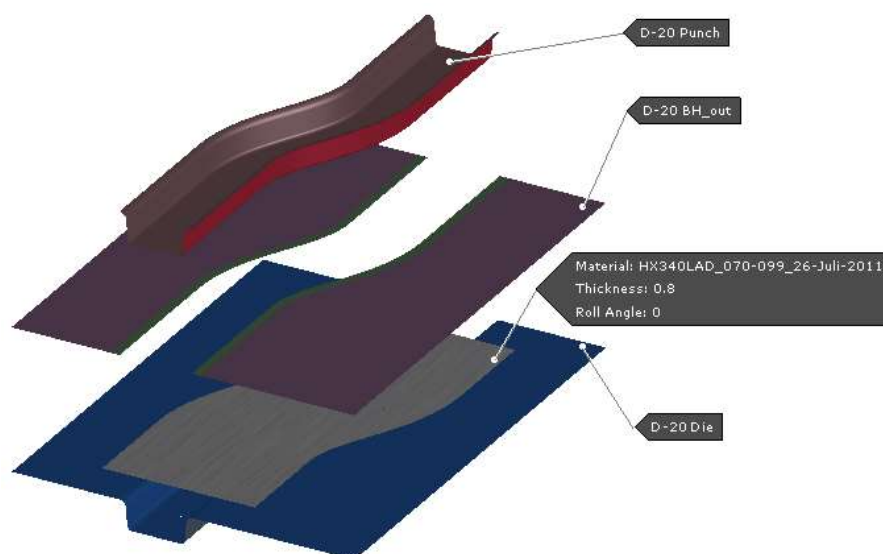
Výše popsané díly jsou v rámci dizertační práce využívány pro experimentální činnost, která je nutná ke splnění dílčích cílů práce. Vybrané díly jsou zároveň použity na konečné ověření navrženého modifikovaného přístupu k problematice odpružení a porovnání se současným přístupem, které je využíváno v praxi. Jelikož se jedná o díly ze skutečného lisovacího procesu, provedené experimenty jsou vždy ověřovány s reálnými výsledky z praxe (měřicí protokol naměřený pomocí souřadnicového měřicího stroje, sken výlisku a náradí, aj.)

6. Dílčí experimenty pro návrh konečné metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení

Před návrhem vhodné metodiky analýzy a kompenzace odpružení byla věnována pozornost dílčím experimentům, díky kterým byly prohloubeny znalosti problematiky odpružení. Experimenty byly zaměřeny zejména na problematiku přesnosti analýzy a kompenzace odpružení s návazností na reálnou výrobní praxi.

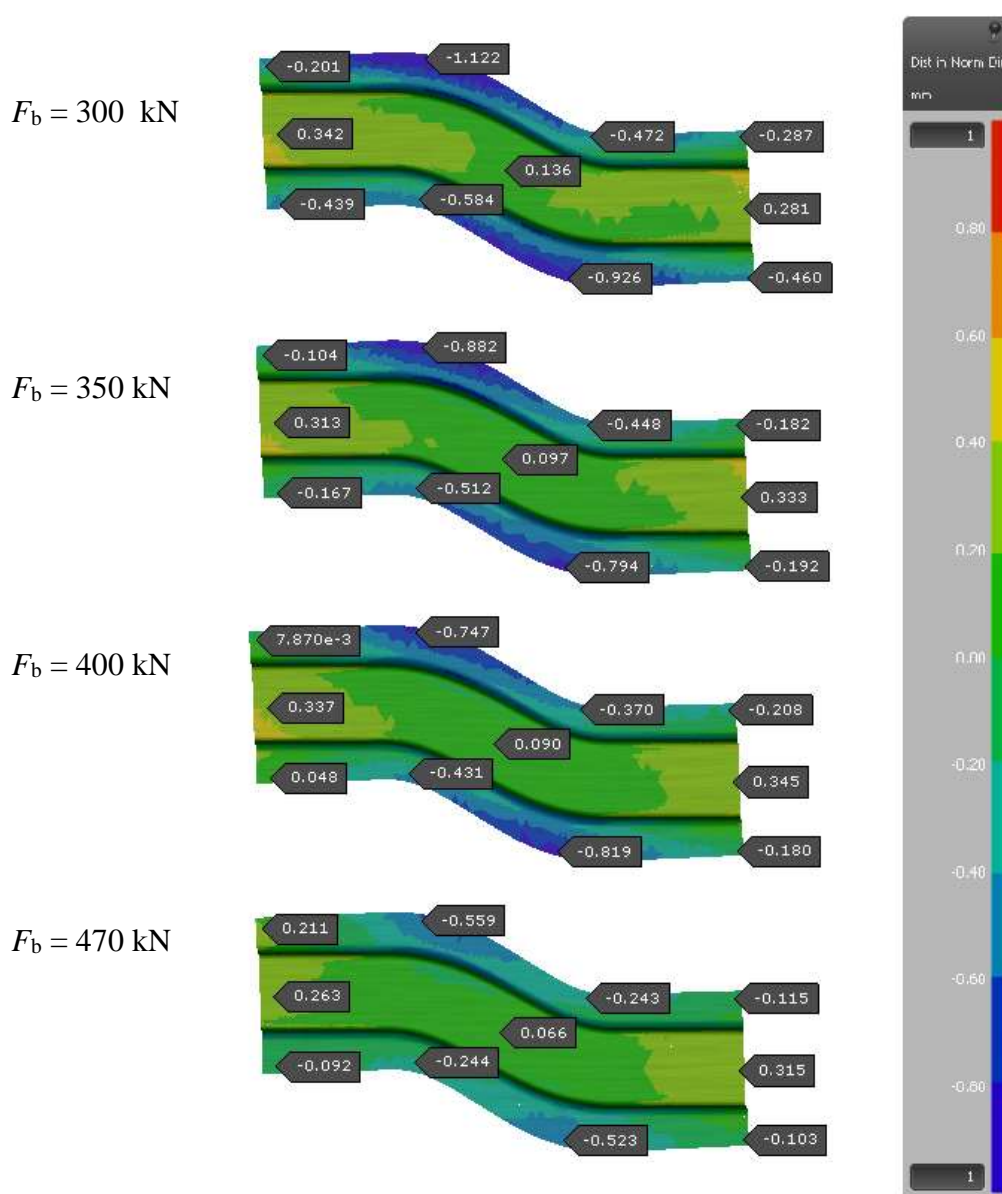
6.1 Analýza vlivu přidržovacího tlaku na velikost odpružení při tahu U profilu

Optimalizace přidržovacího tlaku je v reálném lisovacím procesu velmi jednoduchou a nenásilnou záležitostí. Během této optimalizace se nezasahuje do geometrie nástroje a prakticky jediným reálným omezujícím parametrem jsou možnosti dané lisovací linky (např. plynových pružin). Přidržovacím tlakem lze relativně jednoduše optimalizovat lisovací proces, včetně velikosti odpružení. Pokud do procesu vstupují další faktory, např. vliv brzdících drážek, optimalizace již není tak jednoduchá a jednoznačná. V rámci analýzy problematiky odpružení byl proveden experiment hlubokého tahu a následné analýzy odpružení. Experiment byl zaměřen na optimalizaci odpružení pomocí přidržovacího tlaku u tahu U profilu. Princip experimentu spočívá v provedení jednočinného tahu za pomoci tažníku a tažnice. Tažný proces je ovlivňován primárně přidržovacím tlakem. Na obrázku 6.1 je možné sledovat kinematiku lisovacího procesu.



Obrázek 6.1 – Nastavení kinematiky lisovacích nástrojů tažné operace U profilu. [P10]

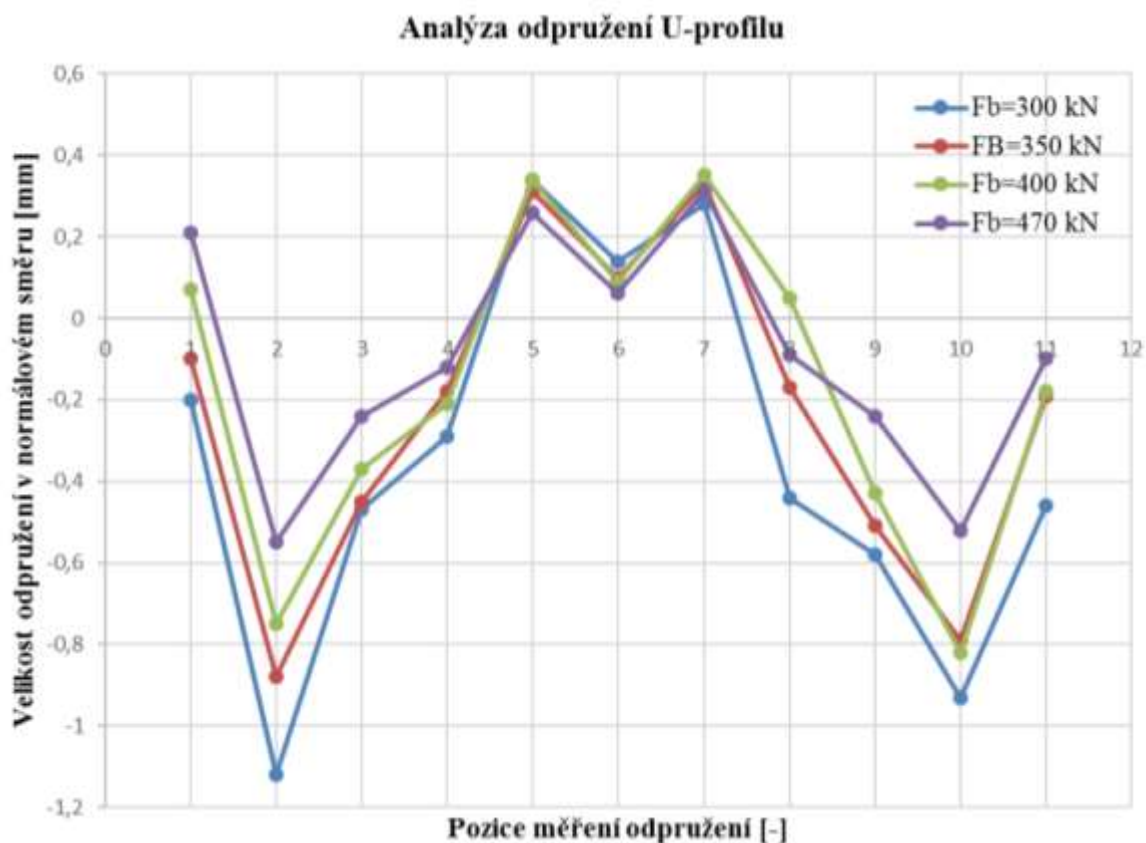
Zkušební vzorek byl vyroben z materiálu HX340LAD (materiálový list uveden v příloze č. 5), jedná se o nízkouhlikovou ocel válcovanou za studena s vyšší mezí pevnosti. Na snímcích na obrázku 6.2 jsou zobrazeny výsledky experimentu v podobě analýzy odpružení v normálovém směru vůči referenční geometrii. Analýza odpružení byla ve všech případech provedena v předem zvolených oblastech. Nejprve byl navržen tažný proces s ohledem na požadovanou vyrobiteľnosť dílu (ztenčení plechu do 25%, absence známek vyčerpání plasticity a trhlin, kritérium „max failure“ do 0,8, absence zvlnění). Následně byla přidržovací síla postupně snižována a navyšována než výlisek vykazoval nevyhovující vyrobiteľnosť. Tímto byly určeny spodní a vrchní hranice přidržovací síly při zachování robustnosti tažného procesu. V tomto konkrétním případě se jednalo o přidržovací síly v rozmezí $F_b = 300 - 470$ kN. [P1], [P10]



Obrázek 6.2 – Analýza vlivu přidržovací síly na velikost odpružení ($F_b = 300$ kN až 470 kN).

[P10]

Na zobrazené analýze si lze všimnout změny hodnot odpružení v závislosti na velikosti přidržovací síly. Při porovnání výsledků tažného procesu s nejnižší ($F_b = 300$ kN) a nejvyšší přidržovací silou ($F_b = 470$ kN) je viditelné zlepšení hodnot odpružení a to v procesu s větší přidržovací silou. Pro přesné porovnání byl z naměřených hodnot vytvořen diagram velikosti odpružení (obr. 6.3). Pokud má být aplikováno povolené kritérium velikosti odpružení $\pm 0,8$ mm, jediná varianta, která by toto kritérium splnila je varianta s největší přidržovací silou $F_b = 470$ kN. U této varianty nepřesáhla velikost odpružení v měřených bodech hodnotu 0,56 mm. [P10]



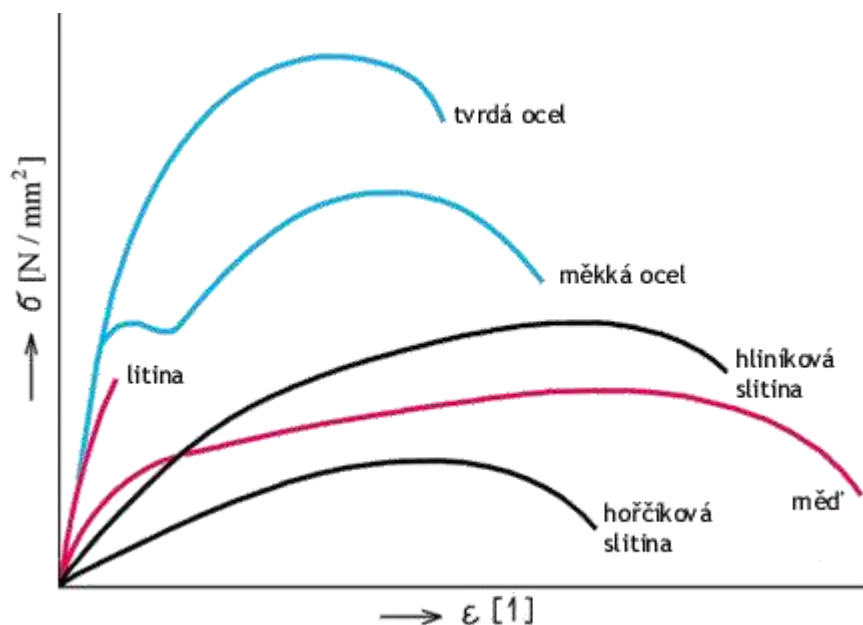
Obrázek 6.3 – Analýza vlivu přidržovací síly na velikost odpružení ($F_b = 300$ kN až 470 kN).

[P10]

Z experimentu tak vyplývá jednoznačná závislost mezi přidržovací silou a velikostí odpružení. Teoretický předpoklad byl díky tomu ověřen, je ovšem vždy potřeba brát ohled také na tvarovou složitost dílu a zejména na brzdící drážky, které v tomto experimentu do procesu nezasahovaly. [P10]

6.2 Experiment závislosti použitého materiálu na velikost odpružení při jednoduchém ohybu

V úvodu do problematiky odpružení byl popsán vliv okrajových podmínek na vznik odpružení. Jednou z okrajových podmínek, která výrazně ovlivňuje velikost odpružení, jsou mechanické vlastnosti zvoleného materiálu. V praxi se lze setkat s rozsáhlou škálou využívaných materiálů. Každý výrobce automobilů k volbě materiálů karoserie přistupuje rozdílně. Např. ve společnosti ŠKODA AUTO stále přetrvává tradiční způsob výroby karoserií, kde materiálem pro výrobu karoserie je ocel. Vnější pohledové díly a většina vnitřních dílů karoserie jsou vyráběny z nízkouhlíkové hlubokotažné oceli (např. DC06, DC05, HX180BD, HX220BD). Pro zbylé části karoserie, zejména pro speciální pevnostní díly se zvýšenou tuhostí, se využívají výšepevné a vysokopevnostní materiály (např. HX340LAD či DP500). Na jiný trend poukazuje např. Audi, kde se již delší dobu využívají hliníkové a hliníkovo-ocelové karoserie (např. kapota a střecha u Audi A3). Důvodem využití hliníku je snížení celkové hmotnosti karoserie při zachování stejné tuhosti a tím pádem snížení výsledných emisí vozidla. Tváření hliníkových slitin doprovází větší náchylnost k odpružení materiálu než je tomu u ocelových slitin. Důvodem je nižší modul pružnosti E . Důkazem je obecné porovnání tahového diagramu pro běžně používané kovové materiály (obr. 6.4). Hliníkové slitiny jsou zároveň nákladnější z pohledu výroby a zpracování a tak v případě jeho aplikace roste celková cena vozidla. [P2, P3]



Obrázek 6.4 – Porovnání tahových diagramů různých typů materiálu. [35]

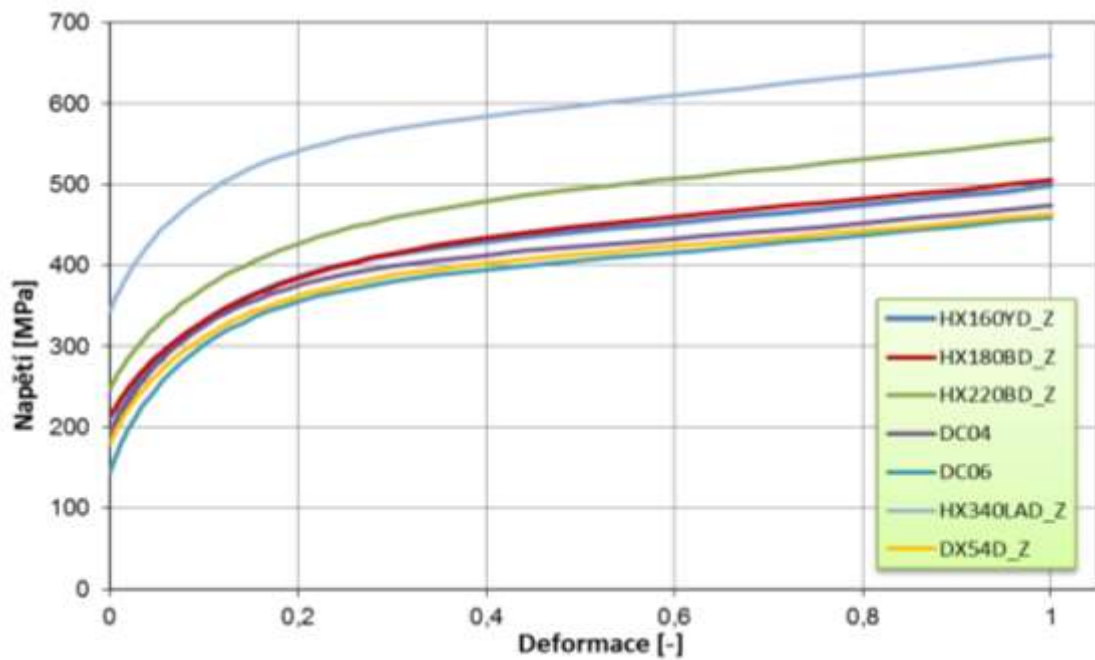
6.2.1 Výběr materiálů pro sledování vlivu mechanických vlastností na velikost odpružení

Práce je koncipována zejména na tváření povrchových velkoplošných dílů karoserie. Vybrané části karoserie vozů ŠKODA Superb a SEAT Ateca pro experimentální příklady jsou vyráběny z nízkouhlíkových ocelí. Z toho důvodu jsou v následujícím experimentu porovnány nejčastěji používané nízkouhlíkové ocelové materiály. Materiálová data pro následující experiment byla poskytnuta jedním z dodavatelů materiálu pro koncern Volkswagen, společností Tata Steel.

Vybrané ocelové materiály pro následující experiment:

- *HX160YD – Z – za studena válcovaná uhlíková ocel, kontinuálně žárově zinkována*
- *HX180/220BD – Z – za studena válcovaná uhlíková ocel, kontinuálně žárově zinkována*
- *DC04, DC06 – za studena válcovaná nízkouhlíková ocel pro tváření za studena*
- *HX340LAD – Z – za studena válcovaná uhlíková ocel, kontinuálně žárově zinkována*
- *DX54D – Z – za studena válcovaná uhlíková ocel, kontinuálně žárově zinkována*

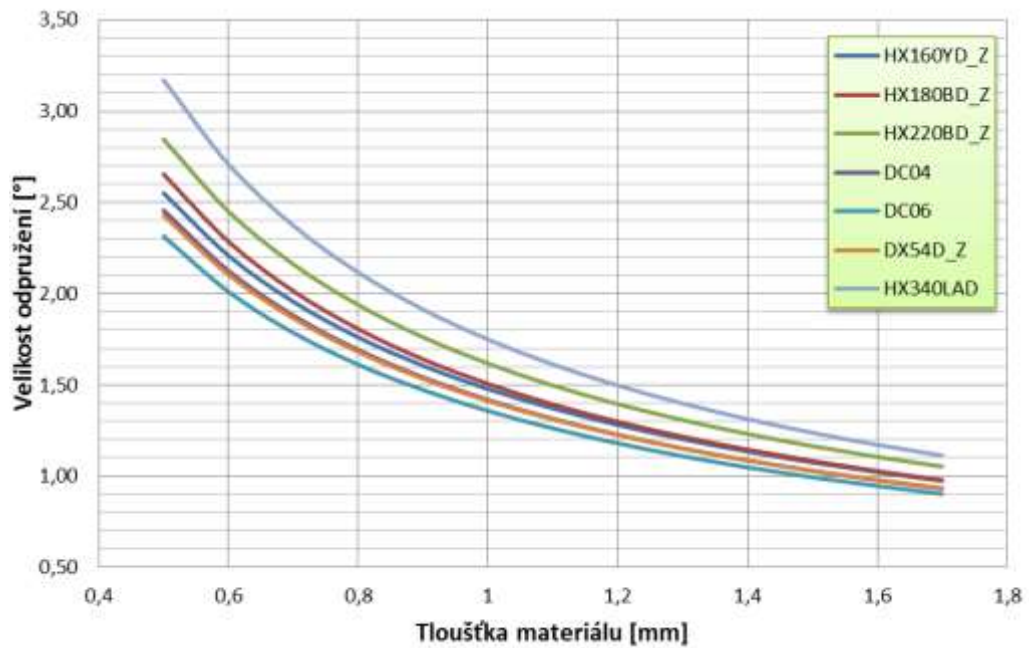
Vybrané materiály byly vybrány na základě aktuálního trendu ve výrobě částí karoserie. Zejména materiály HX180YD a DC06 jsou nejčastěji využívané ocelové materiály pro povrchové části karoserie s tvarově složitější geometrií dílu (např. blatník, páte dveře či postranice). Pro porovnání základních mechanických vlastností vybraných materiálů byly křivky deformačního zpevnění n sjednoceny do jednoho diagramu, ve kterém je možné materiály navzájem porovnat z pohledu závislosti napětí - deformace (obr 6.5).



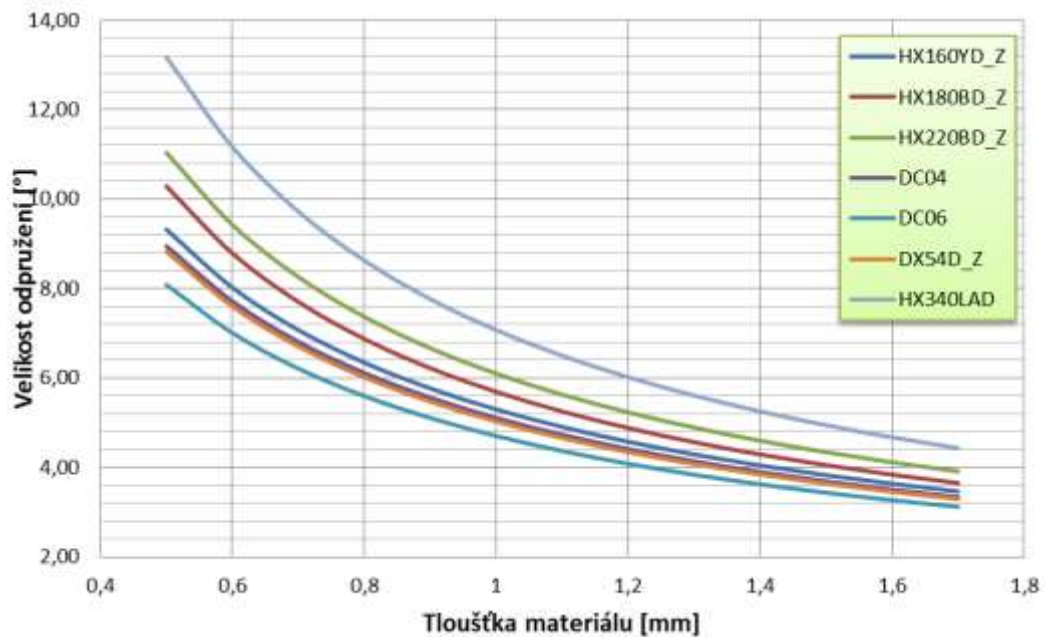
Obrázek 6.5 – Porovnání křivky deformačního zpevnění vybraných materiálů. [P1]

6.2.2 Popis experimentu a porovnání výsledků

Na vybraných ocelových materiálech byla provedena zkouška jednoduchým ohybem s přidržením materiálu. Zkouška ohybem byla provedena na dvou různých poloměrech ohybu (R2 a R10) a různých tloušťkách materiálu (0,5 – 0,7 mm). V následujících diagramech jsou zobrazeny výsledné velikosti odpružení vybraných materiálů za daných podmínek. Výsledky experimentu byly nejprve rozděleny do samostatných diagramů podle použitého ohybového rádia. Analýza odpružení materiálu v závislosti na použitém materiálu pro ohybový rádius R2 je zobrazena na obr. 6.6 a pro ohybový rádius R10 na obr. 6.7. [P4]

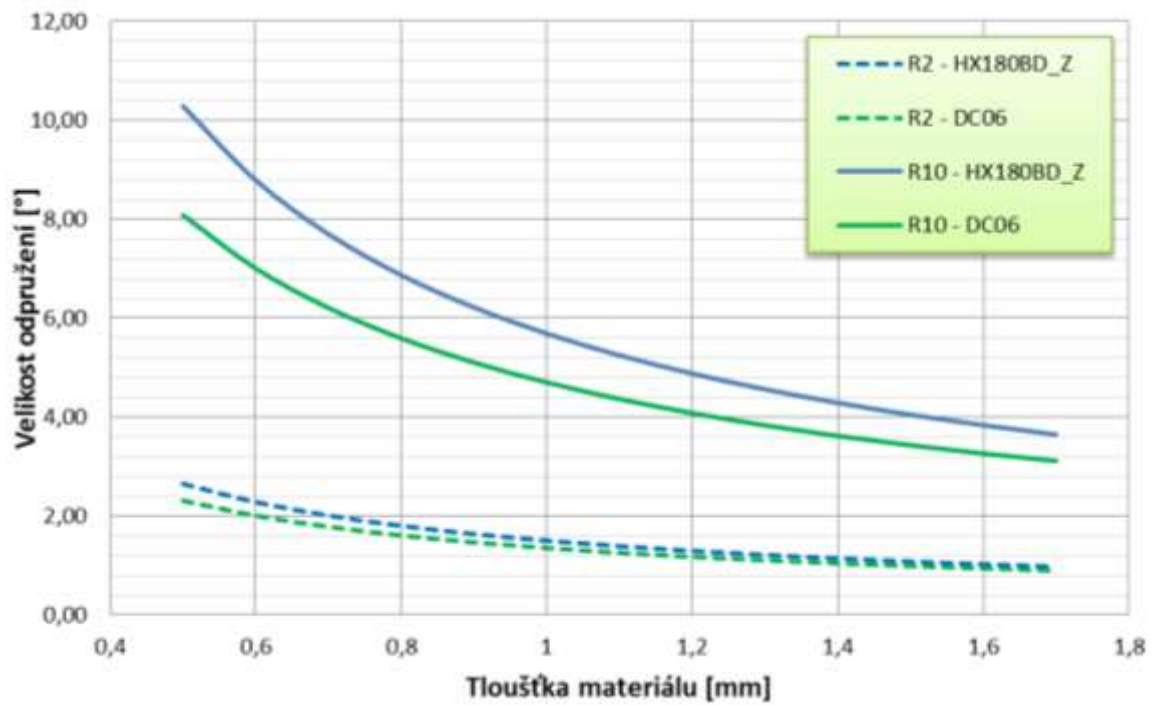


Obrázek 6.6 – Analýza odpružení u vybraných materiálů při jednoduchém ohybu s R2. [P1]



Obrázek 6.7 – Analýza odpružení u vybraných materiálů při jednoduchém ohybu s R10. [P1]

Dále byly z důvodu hlubšího poznání technologických a materiálových podmínek vybrány dva nejpoužívanější materiály (z pohledu výroby povrchových karosářských dílů), kterými jsou materiály HX180BD–Z a DC06. Výsledky porovnání těchto dvou materiálů jsou zobrazeny v následujícím grafu (obr. 6.8).



Obrázek 6.8 – Porovnání velikosti odpružení pro jednotlivé poloměry ohybu na vybraných materiálech (HX180BD-Z a DC06). [P1]

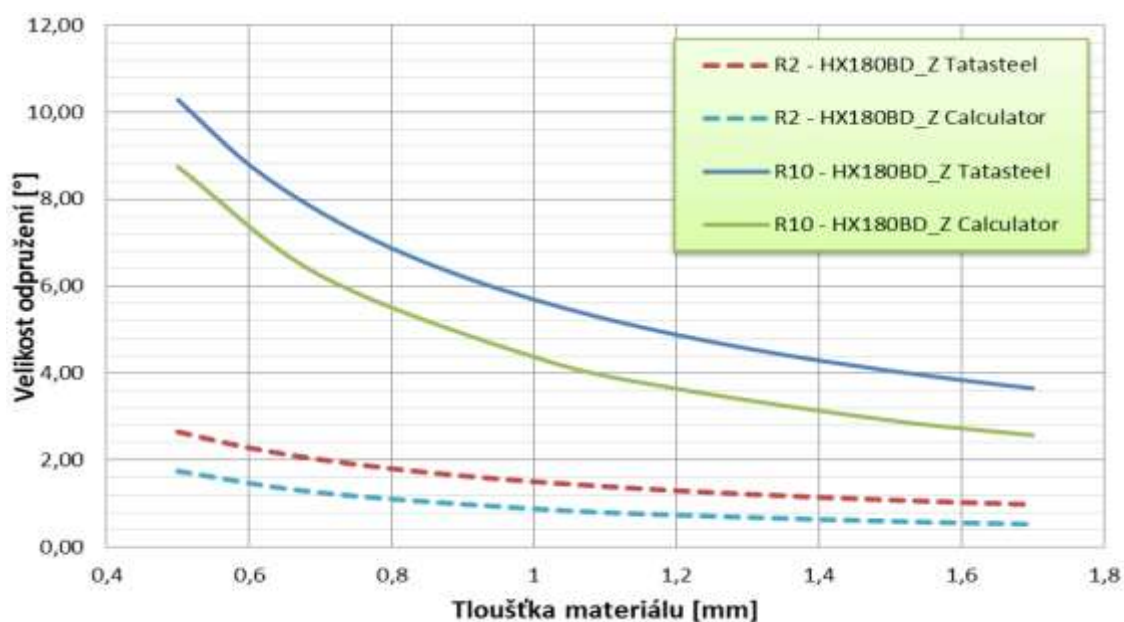
Z diagramů, popisujících výsledky experimentu jasně vyplývá závislost mechanických vlastností použitého materiálu a procesních parametrů lisování na velikost odpružení. Aby bylo možné zjištěné poznatky dále využít v navržené metodice, bylo nutné tyto výsledky ověřit. Způsob, jak zjištěné výsledky experimentu ověřit, je využít kalkulátor odpružení (Springback Calculator) pro jednoduchý ohyb. Kalkulátor odpružení přepočítává velikost odpružení na základě elasticko - plastické teorie a k výpočtu odpružení využívá základní procesní a materiálové podmínky. Velikost odpružení je tak ovlivněna mechanickými vlastnostmi materiálu, tloušťkou plechu, poloměrem a požadovaným úhlem ohybu. Velikost odpružení je počítána dle následujících empirických vztahů. [36]

$$\frac{R_i}{R_f} = 4 \cdot \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right)^3 - 3 \cdot \left(\frac{R_i \cdot Y}{E \cdot T} \right) + 1 \quad (37)$$

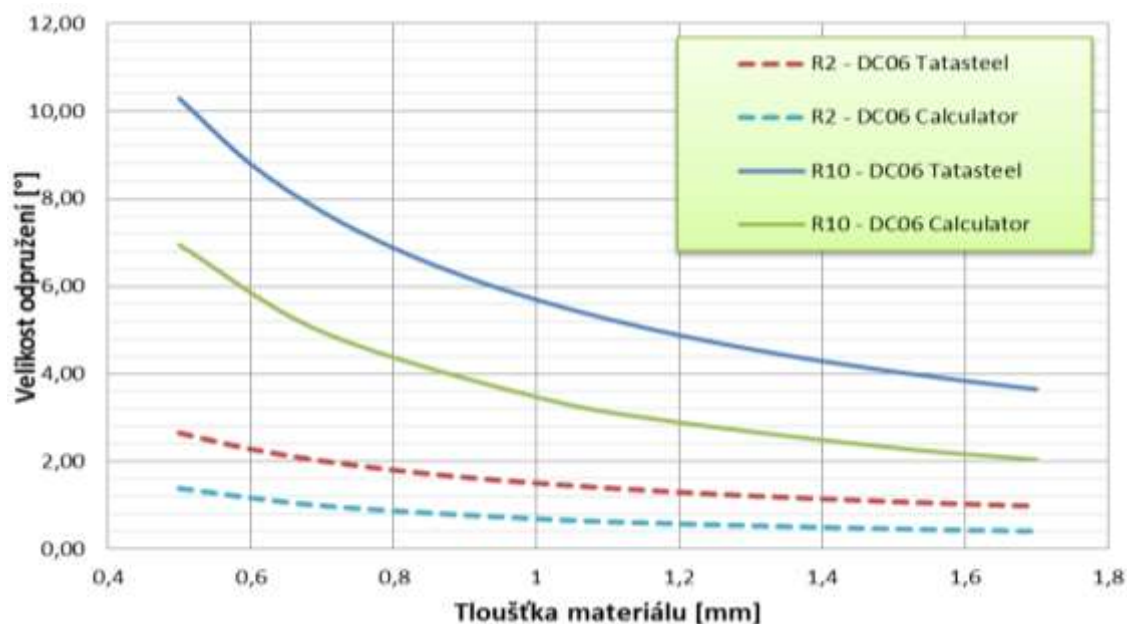
$$R_i \cdot \alpha_i = R_f \cdot \alpha_f \quad (38)$$

Kde parametr R_i a R_f vyjadřují poloměry ohybu materiálu před a po odpružení. Obdobně je tomu tak u úhlů ohybu α_i a α_f . Parametr E vyjadřuje modul pružnosti v tahu, Y představuje mez kluzu materiálu. Parametr T představuje tloušťku ohýbaného materiálu.

Diagramy, zobrazené na obr. 6.9 a obr. 6.10, porovnávají výsledky naměřených hodnot odpružení. Materiálové hodnoty byly získány od společnosti Tata Steel spolu s výsledky velikosti odpružení, ty byly porovnávány s výsledky odpružení podle vztahů (37) a (38). Mechanické vlastnosti byly v rámci porovnání shodné. [P4]



Obrázek 6.9 – Porovnání výsledků experimentu pro materiál HX180BD Z spolu s hodnotami zjištěnými pomocí kalkulátoru odpružení. [P1]



Obrázek 6.10 – Porovnání výsledků experimentu pro materiál DC06 spolu s hodnotami zjištěnými pomocí kalkulátoru odpružení. [P1]

Při porovnání výsledků experimentu získaných od společnosti Tata Steel a velikosti odpružení zjištěných pomocí empirických vztahů (37 a 38) byla v obou případech zjištěna podobnost výsledků. Ovšem přesnost výsledků empirických vztahů, resp. „kalkulátoru odpružení“ je možné brát jen s velikou rezervou (z angl. „approximate formula“, tedy přibližný výpočet). Dále je také potřebné zmínit skutečnost, že v použitých vztazích pro přepočet velikosti odpružení nejsou zahrnuty všechny mechanické vlastnosti, které také částečně ovlivňují velikost odpružení. Jedná se např. zpevnění materiálu n , tažnost A , či vliv anizotropie materiálu. Vztahy (37) a (38) jsou tedy velmi zjednodušené.

Na základě výše provedeného experimentu, je možné potvrdit již dříve zmíněné teoretické předpoklady, které se týkají závislosti materiálových a technologických podmínek vzhledem na velikost odpružení. Jedná se zejména o: [P2], [P3], [P4], [P7]

I. Velikost odpružení je závislá na mechanických vlastnostech, konkrétně na velikosti meze pevnosti materiálu R_m . Jako příklad, při porovnání dvou běžně využívaných ocelových materiálů HX180BD – Z a DC06 vychází odpružení materiálu (tloušťka $t = 1$ mm) následovně:

a. DC06 ... $Y_{R2} = 1,36$ mm, $Y_{R10} = 4,71$ mm

b. HX180BD – Z ... $Y_{R2} = 1,51$, $Y_{R10} = 5,69$ mm

Z toho vyplývá, čím má materiál vyšší mez pevnosti R_m , popř. čím větší je zpevnění materiálu, tím je výsledná velikost odpružení větší (viz závislosti na obr. 6.13 a 6.14). Toto zjištění se shoduje s předpokladem na základě provedené teoretické rešerše v rámci dizertační práce. [37], [38]

II. Velikost odpružení je závislá na velikosti modulu pružnosti E . Čím je modul pružnosti E menší, tím je odpružení výraznější. Např. výlisky z hliníkové slitiny ($E=70$ GPa) mají výrazně horší tendenci dodržet rozměrovou přesnost dílu než výlisky z ocelových materiálů ($E=210$ GPa). [38]

III. Velikost odpružení je úzce spjatá s velikostí poloměru ohybu. Z porovnání na obrázku 6.9 a 6.10 vyplývá, že velikost odpružení byla výrazně ovlivněna použitým poloměrem (zda byl plech ohýbán přes poloměr R_2 nebo R_{10}). Zjištění má význam také pro hluboké tažení, kde poloměr tažné hrany, přes který se materiál přetahuje, významně ovlivňuje velikost odpružení. Na základě tohoto zjištění je doporučeno používat menší ohybové a tažné poloměry ($R_2 - R_5$). Tím dojde k lepšímu přetvoření materiálu, které zároveň zajistí větší tuhost výlisku.

IV. Velikost odpružení je v neposlední řadě ovlivněno použitou tloušťkou materiálu. S nižší tloušťkou materiálu výrazně roste velikost odpružení. Při větší tloušťce materiálu je tuhost výlisku větší, než je energie elastické deformace, díky které vzniká odpružení. Dnešní trend, využívat stále se snižující tloušťky materiálu s cílem dosáhnout nižší váhy karoserie, má negativní vliv na výslednou rozměrovou přesnost výlisků. V případě vnějších částí karoserie, vyráběné z ocelových materiálů, se dnes běžně využívají tloušťky materiálu od 0,6 do 0,8 mm.

Zmíněné závěry, vycházející z výše popsaného experimentu **jsou spíše negativní** zprávou do budoucna. Dnešním trendem v automobilovém průmyslu je snižovat hmotnost karoserie s cílem splňovat stále se snižující emisní požadavky. Tento trend se projevuje využíváním stále pevnějších ocelových materiálu a menších tlouštěk materiálu. Jak bylo výše popsáno, vyšší pevnost materiálu a menší tloušťka materiálu způsobují větší odpružení (viz porovnání v obr. 6.10). Zároveň do této problematiky vstupuje trend tvarově složitých pohledových částí karoserie s vyostřenými hranami, které mají negativní význam na celkovou velikost odpružení. V budoucnu se pro povrchové díly počítá s využitím výšepevných materiálů o mezi kluzu nad 500 MPa nebo materiálů nekonvenčních (duplexní či sendvičové materiály). Nejen z tohoto důvodu je potřeba se problematikou odpružení podrobněji zabývat, aby byla i v budoucnu jednodušeji splněna rozměrová přesnost dílů. [P1]

6.3 Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu

6.3.1 Úvod do přesnosti numerických simulací

Využití numerických metod je v dnešní době běžné. Nejedná se jen o využití v oblasti tváření, ale také slévání, svařování a v mnoho dalších odvětvích, které si dnes předvýrobní fázi výroby nedokáží bez numerických simulací představit. Využití numerických simulací poukazuje na otázku, zda jsou výsledky numerických simulací věrohodné, co do přesnosti výpočtu. Za oblast plošného tváření se vývojáři simulačních programů shodují, že při porovnání s reálným tvářecím procesem, numerické simulace dosahují přesnosti okolo 99%. V případě numerické simulace procesních vlastností tváření (tvařitelnost materiálu, ztenčení plechu, analýza napětíových a deformačních stavů, aj.) lze podobné přesnosti opravdu dosáhnout, avšak při dodržení určitých podmínek.

Hlavní podmínkou je dodržení reálných parametrů při nastavení numerické simulace, které jsou ověřeny praxí (koeficient tření, rychlost příčnicku lisu, brzdící efekt brzdících drážek, aj.). Další podmínkou jsou jednoznačně definované materiálové vlastnosti. V případě materiálových vlastností musí být brán ohled na to, že v praxi jsou výlisky lisovány z různých šarží sviteků plechu z různých materiálových taveb. Každý svitek plechu má rozdílné mechanické vlastnosti a lze se setkat s případy kolísáním např. mezi pevností v řádech desítek MPa. V případě využití numerické simulace pro analýzu odpružení materiálu nedosahují simulace podobně vysoké přesnosti. Opět záleží na vstupním nastavení numerické simulace. Ovšem i při dodržení všech reálných parametrů procesu, se přesnost predikce odpružení stále pohybuje okolo 60% při porovnání s reálným procesem. Mimo nepřesnost způsobenou složitostí problematiky odpružení je zdrojem nepřesností zejména zjednodušování fyzického modelu v numerické simulaci. [P6], [P10]

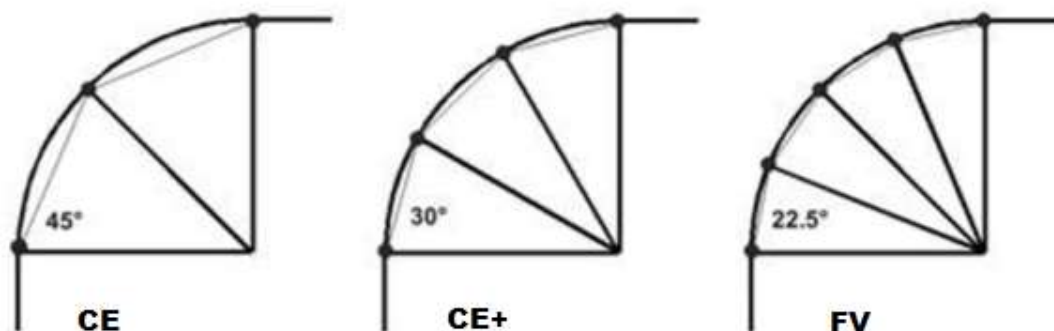
Běžně dochází ke zjednodušování výpočtu numerické simulace bez možnosti ovlivnění uživatelem programu. Jedná se zejména o zjednodušení následujících oblastí: [39]

- *Rigidní, plastické deformační zpevnění*
- *Ohyb materiálu předpokládán za podmínek plošné deformace*
- *Zanedbán Bauschingerův efekt a vliv rychlosti deformace*
- *Pro popis plastické anizotropie a anizotropických vlastností materiálu je využita Hillova teorie napětí a deformace*

Přesnost numerické simulace ovlivňuje z velké části vstupní nastavení výpočetní sítě metody konečných prvků (MKP). Pod nastavením výpočtové sítě MKP si lze představit např. zasítování importovaných dílů, nástroje nebo vyráběného dílu. Na obrázku 6.11 je zobrazen rozdíl výpočtové sítě s využitím přednastavené metody CE, CE+ a FV (popis viz níže). Podrobné rozdíly v nastavení parametrů jednotlivých metod nastavení popisuje tabulka 1. Z příkladu je zřejmé, že hustota sítě je pro výslednou přesnost numerické simulace velmi důležitá. Pro prvotní výpočty, kdy je nejprve definován proces, je doporučováno nastavení CE nebo CE+. Pro konečné ověření pomocí numerické simulace se doporučuje použít nastavení FV. Výpočetní síť s nastavením na FV (viz tabulka 1) vede k přesnějšímu výsledku numerické simulace. Zároveň s tímto nastavením roste také čas potřebný pro výpočet numerické simulace. [P6]

Význam jednotlivých typů nastavení:

- CE – koncept vyhodnocení (z angl. *concept evaluation*)
- CE+ – koncept vyhodnocení s využitím skořepinových elementů (z angl. *concept evaluation*)
- FV – konečná validace (z angl. *final validation*)



Obrázek 6.11 – Příklad nastavení metody výpočtu numerické simulace s vlivem na tažný poloměr hrany. [40]

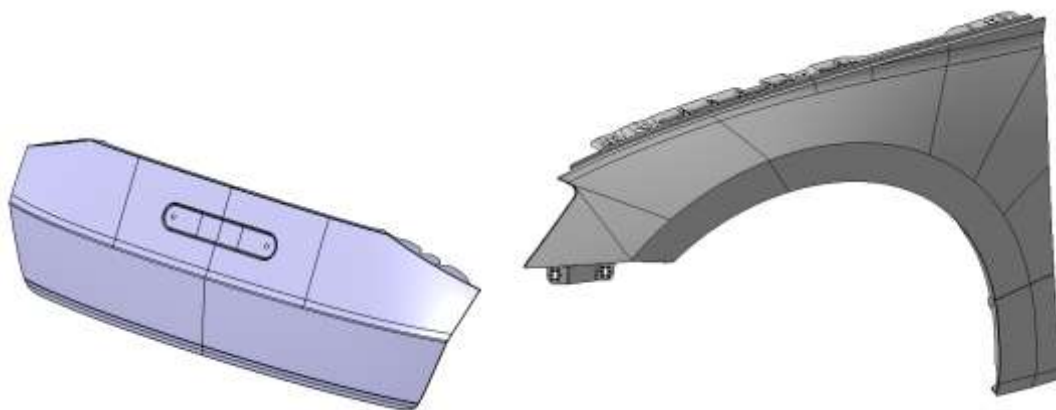
Tabulka 1 – Porovnání metod nastavení zasilování v numerické simulaci [P6]

Strategie	CE	CE+	FV
Typ elementu sítě	BEM-5	EPS-5	EPS-11
Zasilování a tolerance geometrie			
Vzdálenost stehů sítě [mm]	0,5	0,5	0,5
Tolerance zasilování [mm]	0,1	0,05	0,05
Max. délka elementu [mm]	50	30	10
Přesnost výpočtu			
Penetrace hrany [mm]	0,22	0,22	0,22
Max. úhel elementu [°]	30	30	22,5
Max. úroveň zpřesnění [-]	8	7	6
Max. vstupní délka ele. [mm]	40	20	10
Min. délka elementu [mm]	0,31	0,16	0,16

Správná volba strategie zasilování je pro výslednou přesnost numerické simulace kritická. I přes doporučení vývojářů programů využívat jemnější zasilování, není nikde jasně definováno, jak moc tato volba ovlivňuje konečnou přesnost analýzy odpružení. Jelikož se jedná o zásadní část ovlivňující celkovou přesnost simulací a jelikož neexistuje podložená metodika, jakou strategii volit, byly v rámci dizertační práce provedeny experimenty s cílem ověřit přesnost analýzy odpružení v závislosti na vstupním nastavení výpočetní sítě.

6.3.2 Porovnání výpočtů na základě jednotlivých metod nastavení výpočetní sítě

Pro porovnání vlivu výpočtové sítě na konečnou přesnost analýzy odpružení byly vybrány dva díly karoserie. Jako tvarově méně složitý díl byl vybrán díl spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca. Jako druhý a tvarově složitější díl byl vybrán vnější blatník vozu ŠKODA Superb. Finální tvary obou výlisků jsou zobrazeny na obrázku 6.12. V tabulce 2 je popsáno porovnání jednotlivých strategií, resp. metod nastavení numerické simulace.



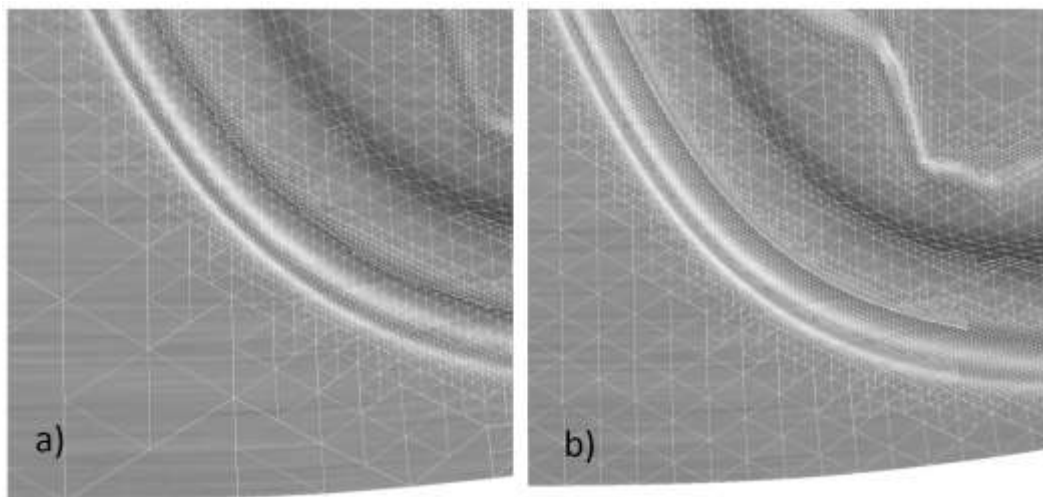
Obrázek 6.12 – Technický díl, geometrie konečných výlisků, a) Spodní páté dveře SEAT Ateca, b) Blatník ŠKODA Superb. [P6]

Tabulka 2 – Porovnání výsledků experimentu jednotlivých metod [P6]

Informace o výpočtu numerické simulace			
Spodní páté dveře SEAT Ateca (4 výpočetní jádra)			
Parametry	CE	CE+	FV
Počet vstupních elementů sítě	1 031	4 121	16 481
Počet konečných elementů sítě	25 342	116 837	248 965
Výpočtový čas [hh:mm:ss]	0:13:44	0:17:45	0:44:59
Velikost dat [Mb]	1 153	1 276	2 286
Blatník ŠKODA Superb (8 výpočetních jader)			
Počet vstupních elementů sítě	5 467	21 865	87 459
Počet konečných elementů sítě	124 623	323 580	428 660
Výpočtový čas [hh:mm:ss]	1:05:24	1:31:31	2:36:49
Velikost dat [Mb]	1 865	2 565	3 159

Z tabulky 2 vyplývá značný nárůst výpočetních časů a velikosti dat v závislosti na použité metodě. Jak v případě blatníku, tak v případě pátých dveří je viditelný rozdíl mezi metodou CE a FV. V obou případech je rozdíl počtů elementů na vstupní síti přibližně 15-ti násobný.

Tento rozdíl, co do počtu elementů výpočetní sítě, také ovlivňuje výsledný výpočetní čas. Jedná se jen o první operaci tažení OP20. S každou další operací se bude nárůst velikosti dat a času pro výpočet zvyšovat. V případě pátých dveří se jedná o 4 lisovací operace a v případě blatníku se jedná o 6 operací. Na obr. 6.13 si lze prohlédnout porovnání výpočetní sítě plechu při zavření brzdící drážky na konci numerické simulace (porovnání mezi metodou CE a FV) dílu pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P6]



Obrázek 6.13 – Porovnání konečné sítě brzdící drážky pátých dveří vozu SEAT Ateca u metod a) CE a b) FV. [P6]

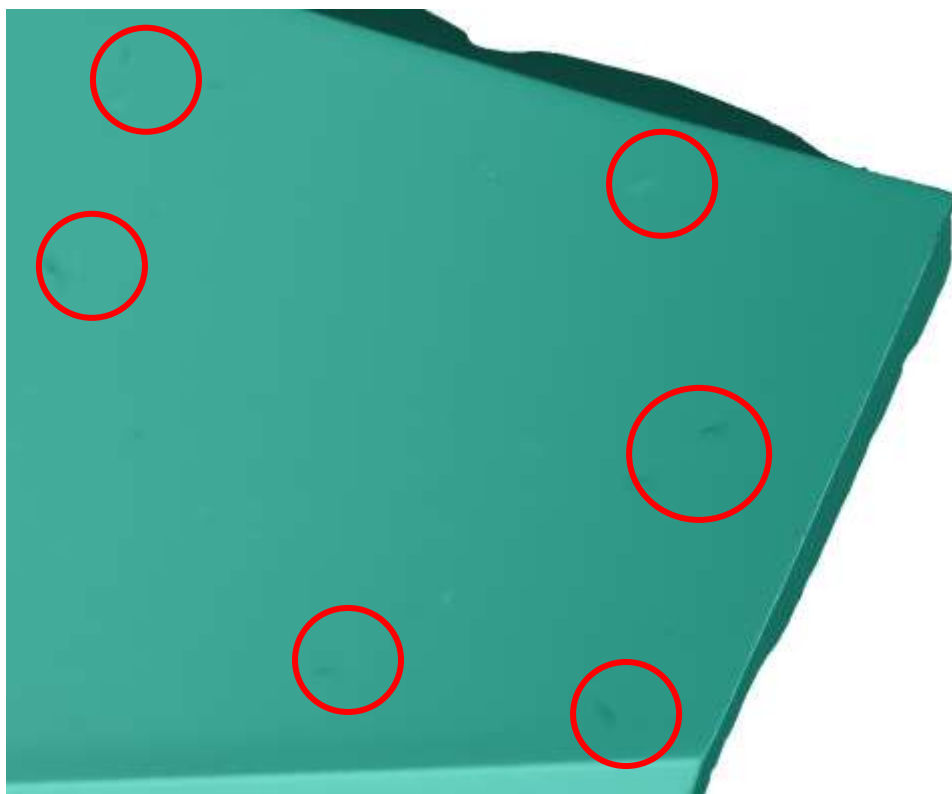
6.3.3 Závislost nastavení výpočetní sítě na přesnost numerické simulace

V rámci zjištění vlivu nastavení výpočetní sítě na přesnost predikce odpružení bylo provedeno porovnání metod zasítování (CE, CE+ a FV). Experiment byl zaměřen na ověření přesnosti analýzy odpružení v porovnání s reálným lisovacím procesem. Pro porovnání byl vybrán díl spodních vnějších pátých dveří (dále jen HKau) vozu SEAT Ateca. Materiálem, z kterého je díl vyráběn, je nízkouhlíková hlubokotažná ocel DC06 (válcovaná za studena) o vstupní tloušťce 0,65 mm. Pro ověření predikce odpružení byla nejprve provedena definice referenční geometrie dílu. Referenční geometrií se rozumí geometrie, ke které je porovnáváno odpružení v normálovém směru plochy. Díl HKau byl po konečné kalibrovací operaci OP50 naskenován. Následně byl sken převeden do CAD dat, tak aby bylo možné provést porovnání reality s výsledky numerické simulace. Naskenovaný výlisek HKau je zobrazen na obrázku 6.14. Skenování dílu bylo provedeno pomocí systému od společnosti GOM. Jedná se o systém „trojitého skenování“ (triple scan) s využitím skenovací robotické hlavice ATOS. Skenovací hlavice obsahuje dvě kamery, které při snímání vytváří stereo efekt, díky kterému je možné dosáhnout velmi přesných výsledků. [P6]



Obrázek 6.14 – Sken odpruženého výlisku vnějších spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca ze skutečného lisovacího procesu. [P6]

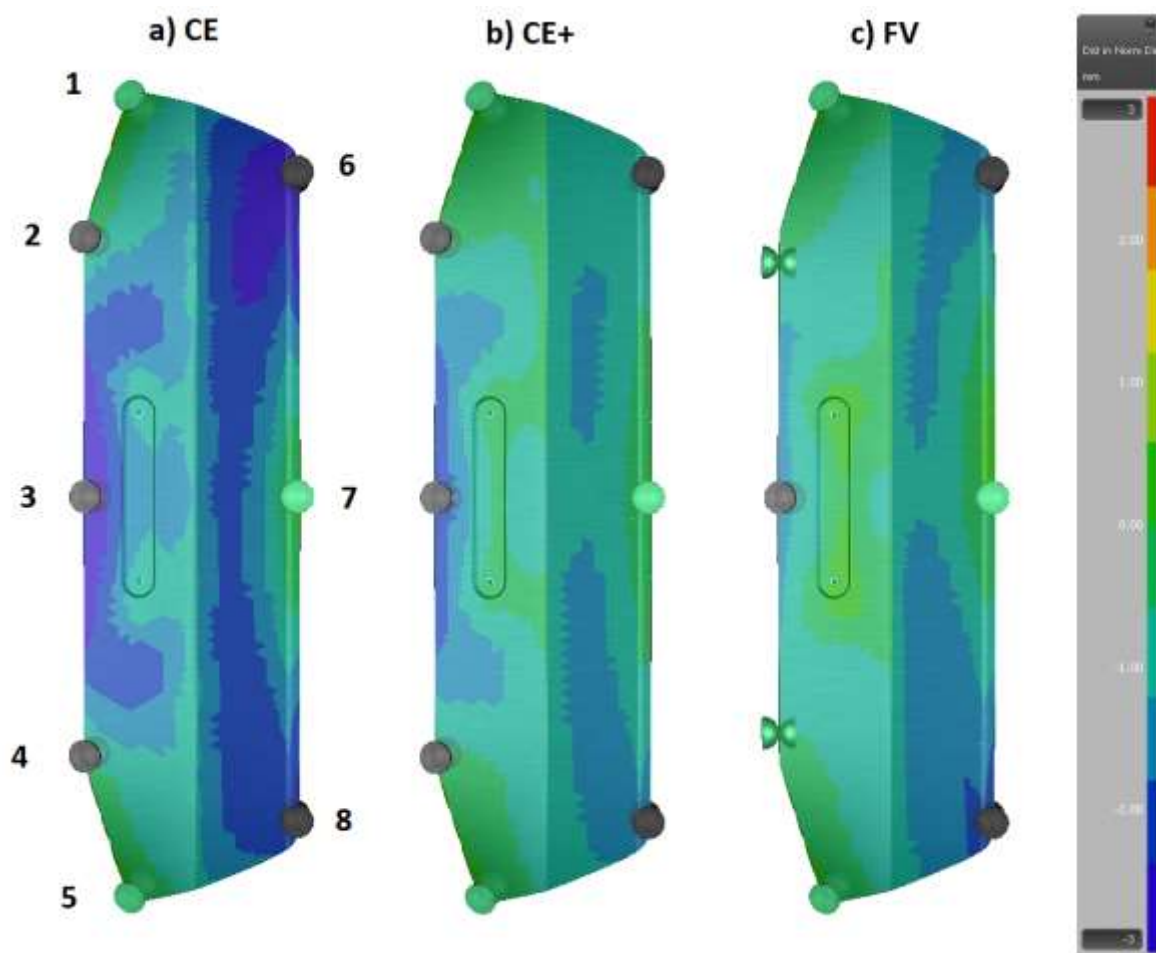
Naskenované plochy velmi často obsahují lokální nerovnosti na geometrii, které vznikly při špatném nasnímání. Pro tento konkrétní díl jsou tyto oblasti zobrazeny na obr. 6.15. Lokální nerovnosti je možné vyhladit pomocí speciálních nástrojů, např. pomocí programu ICEM SURF od společnosti Dassault Systemes, tyto činnosti jsou velmi pracné a nákladné. Jelikož se jedná jen o lokální nerovnosti geometrie, tak pro analýzu odpružení podobné nerovnosti nemají veliký význam na celkové hodnocení rozměrové přesnosti a lze je zanedbat.



Obrázek 6.15 – Ukázka lokálních nerovností na naskenované ploše dílu HKau vozu SEAT Ateca. [P6]

Na následujícím snímku (obr. 6.16) jsou zobrazeny výsledky analýzy odpružení v normálovém směru jednotlivých metod nastavení výpočetní sítě numerické simulace (CE, CE+ a FV). Pro přesné porovnání jednotlivých metod byla analyzována velikost odpružení ve vybraných kontrolních bodech. Pozice kontrolních bodů byly definovány RPS body dle metodického plánu dílu. RPS body označené zelenou barvou znamenají aktivní RPS body do kterých je díl upnut při měření (Haupt RPS). RPS body označené černou barvou jsou neaktivní body při upínání dílu.

Velikost odpružení v kontrolních bodech popisuje tabulka 3. Z vizuálního porovnání je patrné, že největší geometrické nepřesnosti vzhledem k referenční geometrii dosahuje nastavení sítě CE, tedy nejhruběji nastavená síť s membránovým typem elementu (jen plošné napětí a deformace, které jsou vztažené ke střední vrstvě materiálu, homogenní chování ve smyslu tloušťky plechu).



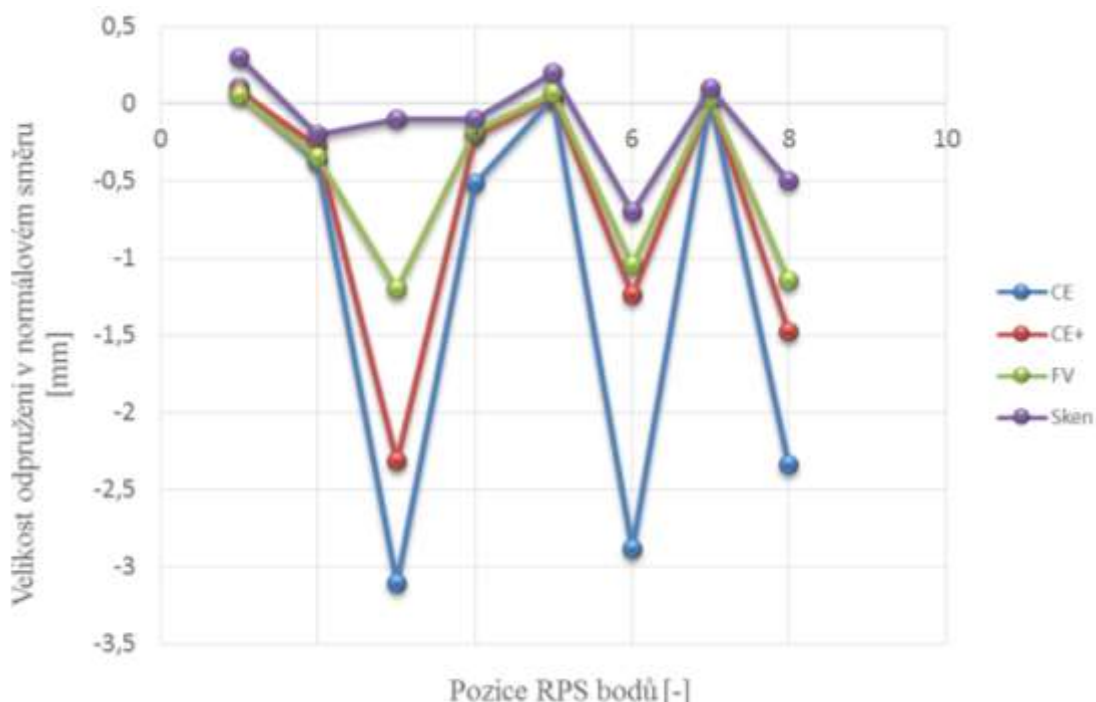
Obrázek 6.16 – Analýza odpružení jednotlivých metod nastavení sítě numerické simulace. Černé a zelené body označují kontrolní RPS body, ve kterých byla měřena hodnota normálového odpružení. [P6]

Rozdíly mezi výsledky odpružení v metodě CE+ a FV jsou relativně minimální. Důvodem, proč jsou výsledky těchto metod velmi podobné je, že obě metody vychází ze skořepinové sítě typu „shell“ (přesnější popis problému, 6 stupňů volnosti, simulace kombinovaného napětí). Experiment tak dokazuje zajímavý fakt, a to, že **přesnost predikce odpružení ovlivňuje více typ sítě a méně velikost samotného elementu.**

Tabulka 3 – Normálové odpružení vzhledem k referenční geometrii v kontrolních RPS bodech: [P6]

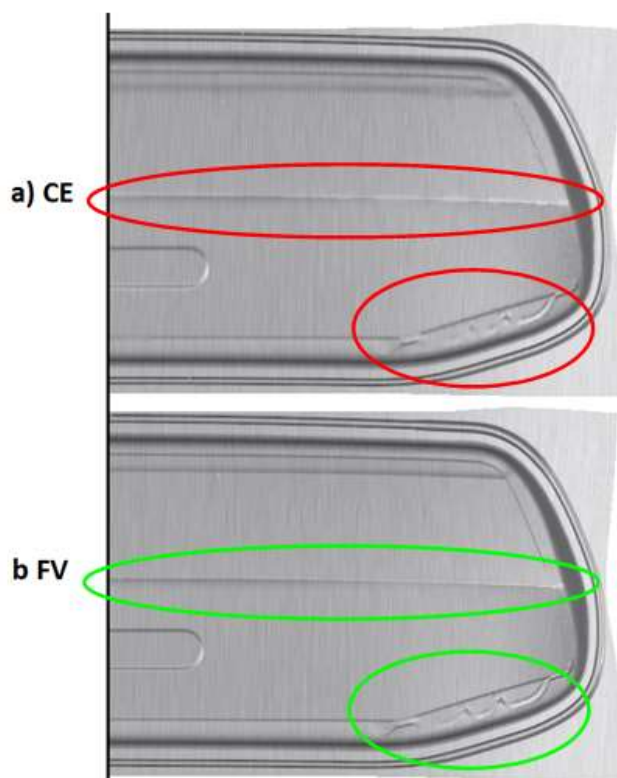
Pozice RPS bodu	Velikost odpružení [mm]			
	Sken plochy	CE	CE+	FV
1	0,30	0,11	0,08	0,05
2	-0,20	-0,38	-0,28	-0,35
3	-0,10	-3,11	-2,32	-1,2
4	-0,10	-0,52	-0,21	-0,18
5	0,20	0,04	0,05	0,07
6	-0,70	-2,89	-1,24	-1,05
7	0,10	0,04	0,033	0,03
8	-0,50	-2,34	-1,48	-1,15

Na následujícím grafu (obr. 6.17) je zobrazeno grafické porovnání analýzy odpružení v experimentu. Čím více se hodnoty blíží k nule, tím je analýza odpružení přesnější.



Obrázek 6.17 – Graf porovnání analýzy odpružení jednotlivých metod nastavení sítě numerické simulace. [P6]

Podle předpokladu, nejpřesnějších výsledků při predikci odpružení je dosaženo při použití skořepinových elementů typu „shell“. Využití membránových elementů pro analýzu odpružení je nevhodné také z pohledu kvality výsledné plochy. Jak si lze všimnout na obr. 6.18, kombinace hrubé sítě a membránového elementu má za následek velmi špatnou kvalitu ploch a to zejména na ostrých pohledových hranách. Nastavení simulace na metodu CE má tak jedinou výhodu, tou je výpočetní rychlost, která má benefit zejména při prvních iteracích metodického plánování. [P6]



Obrázek 6.18 – Porovnání metody zaskřepování modelu a) CE a b) FV z pohledu kvality numerické simulace. [P6]

6.3.4 Závěr experimentu závislosti nastavení numerické sítě na přesnosti numerické simulace

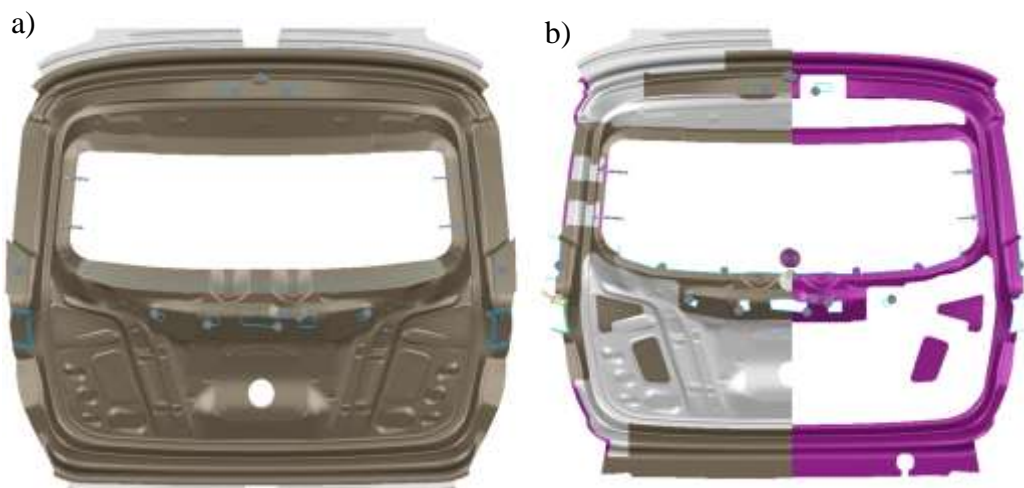
V rámci experimentu bylo ověřeno doporučení využívat pro analýzu odpružení nastavení výpočetní sítě se skořepinovými elementy typu „shell“ s hustotou sítě minimálně na úrovni nastavení CE+. Výsledky přesnosti odpružení s využitím membránového elementu, spolu s hrubým nastavením sítě, se ukázaly jako nevhodné. Experimentem byla také ověřena skutečnost, že hustota sítě ovlivňuje přesnost odpružení méně. Doporučení nastavit síť vždy na co nejjemnější hustotu není výhodné, následně roste velikost dat a čas výpočtu numerické simulace.

I s nastavením numerické simulace s výše doporučenými parametry, se přesnost analýzy odpružení stále liší od výsledků z reálného lisovacího procesu. Zejména ve středové oblasti výlisku (kontrolní bod 3) se výsledky analýzy výrazně liší od naskenované referenční geometrie. V ostatních oblastech byla orientace odpružení dodržena a při použití metody FV byla dosažena i relativně vysoká přesnost analýzy. [P6], [P7]

6.4 Vliv použité geometrie lisovacího náradí v numerické simulaci na přesnost odpružení

Přesnost predikce odpružení není závislá jen na nastavení výpočetní sítě numerické simulace. Konečnou přesnost predikce odpružení velmi ovlivňuje podobnost numerické simulace s reálným lisovacím procesem. Čím je numerická simulace reálnému lisovacímu procesu bližší, tím jsou výsledky odpružení přesnější. Platí zde pravidlo, aby při nastavení numerické simulace docházelo k co nejmenšímu zjednodušení výpočetních a procesních parametrů. Zjednodušení výpočtu numerické simulace bylo již popsáno v předchozích kapitolách (2.4 *Možnosti v přístupu k problematice odpružení* a 6.3 *Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu*). Pokud jde o procesní parametry, i těchto se týká zjednodušení numerické simulace, kde je cílem provádět méně komplikované a časově náročné výpočty. Jedná se zejména o zjednodušenou geometrii nástroje v numerické simulaci (brzdící drážky a odlehčení nástroje). V případě brzdící drážky je velmi běžně oproti praxi využíván zjednodušený virtuální přepočet brzdné síly v daném místě plechu. V praxi ovšem materiál fyzicky prochází geometrií brzdné drážky. Rozdíl ve výpočtu s fyzickými 3D brzdícími drážkami a s adaptivními drážkami (virtuální přepočet brzdné síly) je výrazný. Nároky na výpočetní čas a na velikost dat je až dvojnásobný. Z toho důvodu se doporučuje využívat fyzické drážky až v konečné fázi metodického plánování. [P7]

Další důležitou kapitolou je **odlehčení nástroje**, které je v praxi běžně využíváno. Provádí se zejména z důvodu úspory nákladů na odlitek a na následné obrábění na čisto. Odlehčení nástroje se provádí běžně v následných operacích po tažné operaci. Odlehčením se rozumí, že výlisek je sevřen jen v některých partiích. Pouze tyto oblasti jsou obrobené na čisto a následně zapracované. Pro ukázkou je na obr. 6.19 zobrazeno porovnání nástrojů z numerické simulace s neodlehčenými a s odlehčenými nástroji ve střižné operaci OP40.

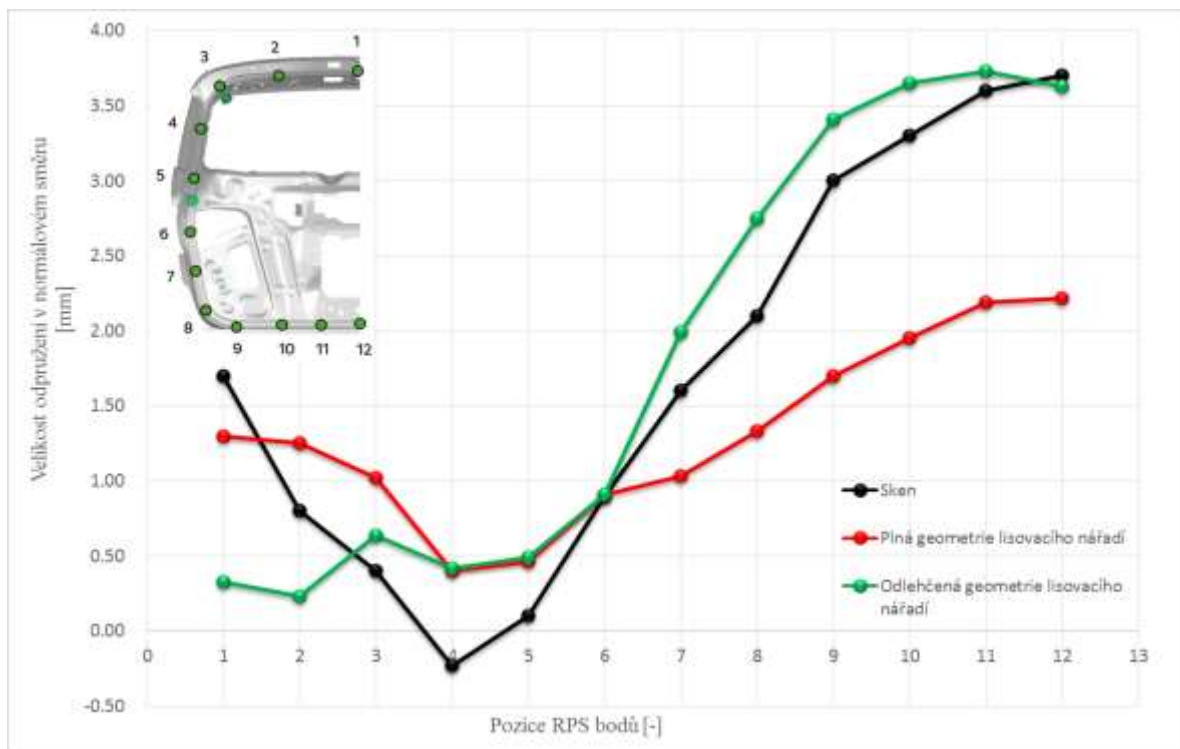


Obrázek 6.19 – Porovnání použité geometrie lisovacího náradí (zobrazeny nástroje ze střížné operace OP40) v numerické simulaci a) Neodlehčená geometrie a b) Odlehčená geometrie podle reálného lisovacího procesu (na levé straně řezu nástrojem zobrazen plech sevřený spodní a vrchní částí nástroje, na pravé straně řezu nástrojem je zobrazena jen spodní část nástroje). [P8]

Důvod, proč se v numerické simulaci používá odlehčení nástrojů jen zřídka je ten, že časové nároky na přípravu ploch nástrojů, jsou několikanásobně větší. V případě analýzy odpružení odlehčení nástrojů hraje podstatnou roli. Tab. 4 a diagram na obr. 6.20 zobrazují analýzu odpružení v porovnání s reálně naměřeným skenem. Pro porovnání byly použity dvě numerické simulace, jejichž nastavení se lišilo v odlehčení geometrie lisovacích nástrojů. Upnutí výlisku do nástavku bylo přizpůsobeno reálné analýze odpružení. Výlisek byl při skenování ustaven metodou „best-fit“, tedy metodou největší shody. [P8]

Tabulka 4 – Přesnost predikce odpružení v závislosti na použité geometrii nástrojů: [P8]

Pozice měření (viz obr. 6.20)	Velikost odpružení [mm]		
	Sken plochy	Plná geometrie lisovacího náradí	Odlehčená geometrie lisovacího náradí
1	1.70	1.30	0.33
2	0.80	1.25	0.23
3	0.40	1.02	0.64
4	-0.30	0.40	0.59
5	0.10	0.46	0.49
6	0.90	0.91	0.91
7	1.60	1.03	2.23
8	2.10	1.33	3.04
9	3.00	1.70	3.41
10	3.30	1.95	3.89
11	3.60	2.19	3.73
12	3.70	2.22	3.63



Obrázek 6.20 – Grafické porovnání naměřených hodnot velikosti odpružení analýzy numerické simulace v závislosti na použité geometrii náradí. [P8]

Na základě porovnání, které je zobrazeno na obr. 6.20, je možné sledovat jednoznačný rozdíl v hodnotách odpružení. V případě numerické simulace, ve které bylo provedeno odlehčení lisovacích nástrojů byly naměřeny výrazně přesnější hodnoty odpružení materiálu. Ve spodní oblasti výlisku se velikost odpružení liší až o 1 mm, což je v praxi lisovacích procesů velmi vysoká hodnota.

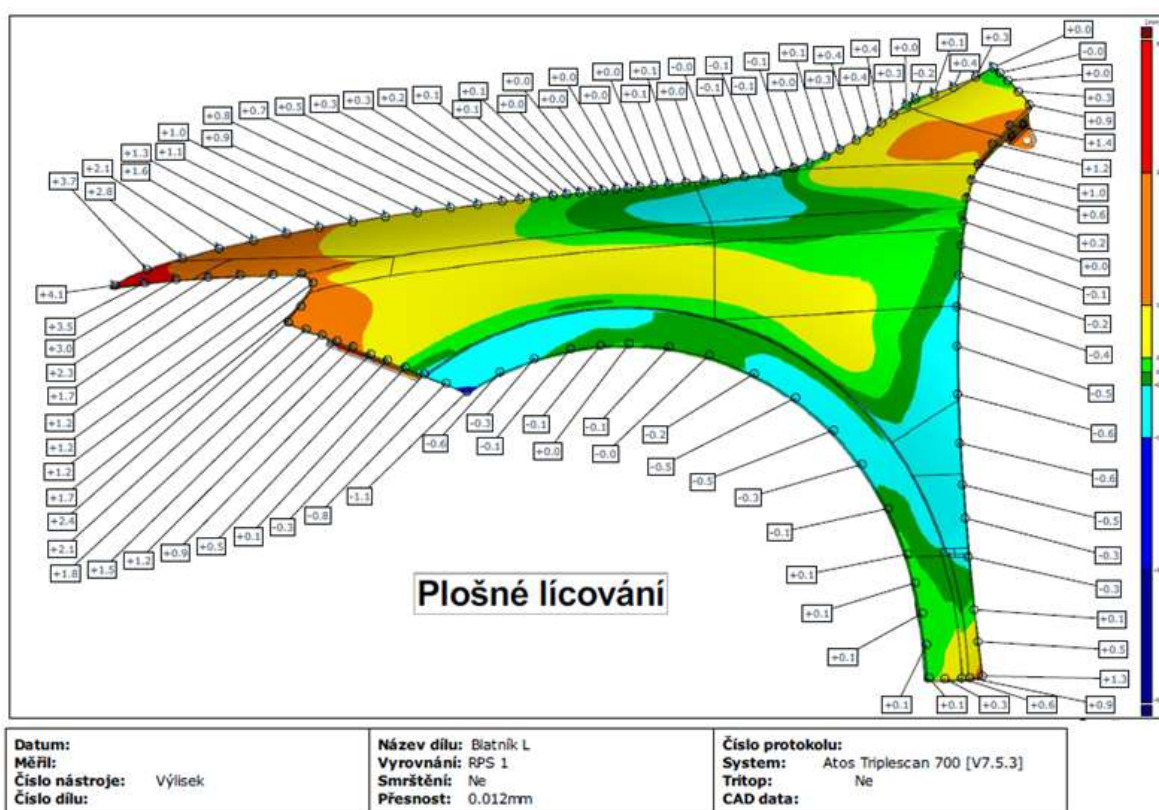
Z této části experimentu jednoznačně vyplývá, že v momentě, kdy se metodické plánování lisovacího procesu přesune do fáze, ve které je řešena analýza odpružení, je nutné numerickou simulaci nastavit tak, aby co nejlépe odpovídala reálnému lisovacímu procesu. V případě nedodržení tohoto doporučení může dojít k velmi odlišným výsledkům velikosti odpružení oproti reálnému lisovacímu procesu. Na základě špatné predikce odpružení může následně při výrobě náradí dojít k dodatečným nákladům na úpravu lisovacích nástrojů. V těchto případech se jedná o částky ve statisících až milionech českých korun. [P6], [P7]

7. Problematika vyhodnocení odpružení v lisovacím procesu

Jednou z dílčích částí, kterou bylo nutné se při návrhu metodiky pro kompenzaci odpružení zabývat, bylo navržení vhodné metodiky analýzy odpružení. Bez pečlivě a správně zvolené metodiky vyhodnocování odpružení, není možné dosáhnout relevantních výsledků i v případě správně provedené kompenzace odpružení. Analýzou odpružení se rozumí souhrn nástrojů, kterými lze co nejpřesněji definovat velikost odpružení ve formě geometrické změny, a to jak virtuálně v rámci predikce, tak skutečným měřením vylisovaného dílu.

7.1 Současné přístupy k analýze odpružení

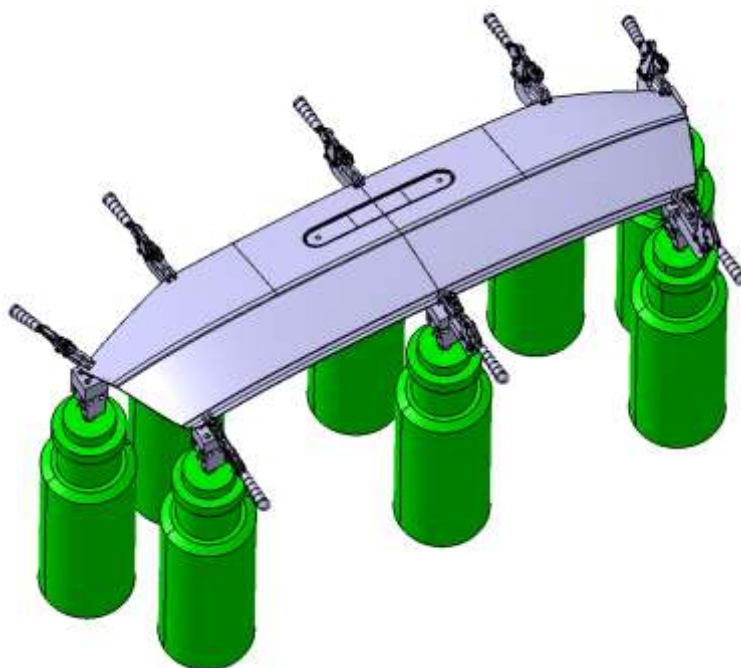
Eventualit, jak velikost odpružení analyzovat je hned několik. Metody analýzy odpružení lze rozdělit do dvou hlavních kategorií. Do první kategorie patří **virtuální analýza** odpružení s využitím nástrojů v numerické simulace. Druhou kategorií je **reálné měření** již vylisovaného dílu, např. měřením dílu na souřadnicovém měřícím stroji nebo naskenováním tvaru vylisku. Na základě takového měření je vytvořen protokol o měření, jako je tomu na obr. 7.1.



Obrázek 7.1 – Příklad měrového protokolu pro díl blatníku. Měřeno skenovacím systémem ATOS Triplescan 700. [P9]

7.1.1 Popis analýzy odpružení v reálném procesu výroby

Analýza odpružení skutečného dílu je nejčastěji prováděna měřením na souřadnicovém měřicím stroji. Výlisek je upnut v upínacích bodech do speciálního přípravku, který má za cíl sevřít výlisek (viz obr. 7.2). Pozice upínacích bodů je dána předem zvolenými kontrolními body, jejichž pozice se liší každým dílem. V automobilovém průmyslu se tyto kontrolní body označují jako RPS body (z angl. Reference point system). Jedná se o systém referenčních měřicích bodů, které slouží ke vzájemné kontrole polohy dílů na voze. Výstupem analýzy reálným měřením je měrový protokol, který podrobně popisuje geometrii výlisku. Systém souřadnicového měřicího stroje umožňuje následně provést kontrolu s referenční (nominální) geometrií výlisku a stanovit tak velikost odpružení.



Obrázek 7.2 – Příklad upnutí dílu HKau do upínacího přípravku při reálném měření na souřadnicovém měřicím stroji. [P8]

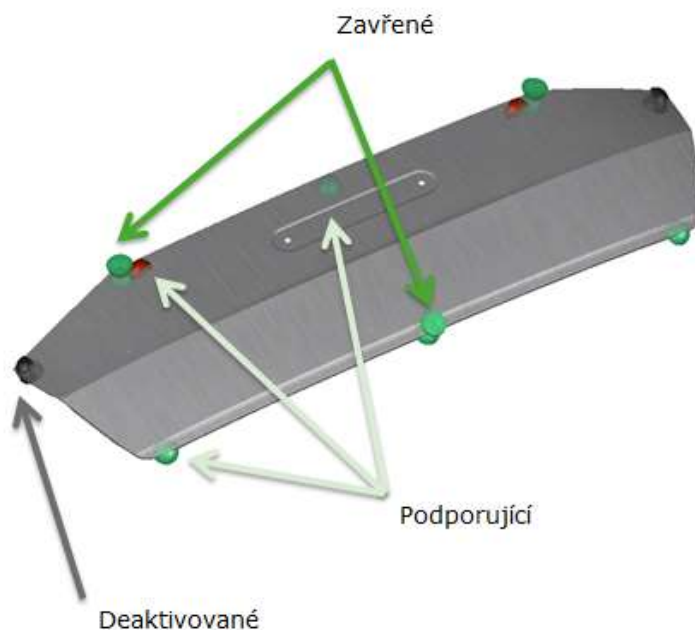
V případě reálného měření bývá díl vždy upnut v pozicích hlavních RPS bodů. Tímto se zaručí reprodukovatelnost měření. V případě smysluplné analýzy odpružení není upnutí do hlavních měřicích bodů vždy **vhodné**. Pokud je např. díl upnut po celém obvodu, **nemá tak dostatečnou volnost** a nedojde k adekvátnímu odpružení.

Jako řešení lze využít metodu upnutí jen do vybraného minimálního počtu upínek, resp. RPS bodů, které:

- a) Zaručí výlisku možnost se volně odpružit (minimální vnitřní pnutí v upínkách)
- b) Zamezí výlisku se v upínkách pohybovat (minimalizování stupňů volnosti)
- c) Minimalizuje vliv gravitace (viz popis níže)

V případě velkoplošných dílů z méně pevných materiálů hraje velmi důležitou roli vliv **gravitace**. V případě špatně zvolené metodiky analýzy odpružení (nevhodně zvolené upínací body a poloha dílu) způsobuje gravitace geometrickou změnu výlisku a to i v případě, kdy je reálné odpružení dílu minimální. Při takové analýze není možné určit opravdovou velikost odpružení, jelikož je analýza ovlivněna geometrickou změnou způsobenou gravitací výlisku.

Vzhledem k velikému vlivu gravitace je potřeba vhodně definovat počet a funkci jednotlivých RPS bodů a polohy při analýze. Jak již bylo popsáno, v ideálním případě je cílem zamezit nepatřičnému pohybu dílu a zároveň minimalizovat vliv gravitace, ale také umožnit výlisku se odpružit. Jednou z možností, jak tyto podmínky splnit, je kombinovat upínky **zavřené** (sloužící k upnutí výlisku) a **nezavřené** (sloužící jen jako podpora dílu z důvodu gravitace). Takovýto přístup je z hlediska analýzy odpružení ideální, není však možné definovat jednotnou ideální metodiku upnutí pro všechny díly. Pro každý díl je doporučen individuální přístup. Na obr. 7.3 je např. znázorněna navržená metodika upnutí dílu spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca.



Obrázek 7.3 – Ukázka možné strategie pro vhodné upnutí dílu pro následnou analýzu odpružení na díle HKau SEAT Ateca. [P8]

Další možností, jak vyhodnocovat již vyrobený díl z pohledu odpružení, je využití naskenovaného dílu. Při této metodě je naskenován konečný výlisek, který je následně převeden do CAD dat ve formě mračna bodů (formát .STL). Získaná data je možné porovnávat s referenční geometrií nebo přímo s výsledky numerické simulace.

Nejčastěji se lze setkat se skenováním dílu přímo v nástrojích na matici, na zvedačích nebo při upnutí do RPS bodů v přípravku. Tato metoda je nejčastěji využívána pro rychlé porovnání reálné geometrie vyrobeného dílu s výsledky numerické simulace. Pro relevantní výsledky je cílem zajistit stejných podmínek jak při reálném měření, tak v numerické simulaci.

7.1.2 Popis virtuální analýzy odpružení v numerické simulaci

Přístup k virtuální analýze odpružení je v praxi stále trochu skeptický. Hlavním důvodem bývá zejména nepřesnost analýzy odpružení. Analýzu odpružení doprovází veliké množství faktorů, které bez vhodné metodiky vedou k velmi špatné přesnosti analýzy odpružení. Za nepřesností při práci s odpružením v numerické simulaci stojí zjednodušení fyzického modelu při **výpočtu MKP** (viz kapitola 6.3 – *Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu*) a procesních parametrů. Podobné zjednodušení si lze dovolit u numerické simulace, ve které je prováděno vyhodnocení typu tvařitelnost, ztenčení materiálu, zpevnění materiálu, aj. Ovšem v případě analýzy geometrických vad (odpružení, auditové závady, resp. propady geometrie) není možné postupovat stejným způsobem. Naopak, pokud má být docíleno přesné analýzy geometrických vad, je potřeba výpočet fyzického modelu přiblížit co nejvíce realitě.

V numerické simulaci nejčastěji dochází ke zjednodušení následujících procesních parametrů, které mají vliv na nepřesnost analýzy odpružení: [P2], [P7]

- **Koeficient tření** – standartní nastavení Coulombova koeficientu na hodnotu $\mu=0,15$ pro všechny případy numerické simulace. V praxi je parametr tření upravováno přímo na lisu pomocí lokálního či celkového přimazávání nástrojů. Zároveň dochází ke změně tření přímo v procesu v závislosti na teplotě, rychlosti nástrojů, drsnosti povrchu, aj.
- **Zjednodušení brzdného efektu** – výpočet numerické simulace se velmi často provádí s adaptivními brzdícími lištami, čili je použit zjednodušený brzdný efekt přepočtem na brzdou sílu. Výpočet numerické simulace probíhá bez fyzického průchodu plechu přes brzdící drážku jak je tomu v reálném procesu.

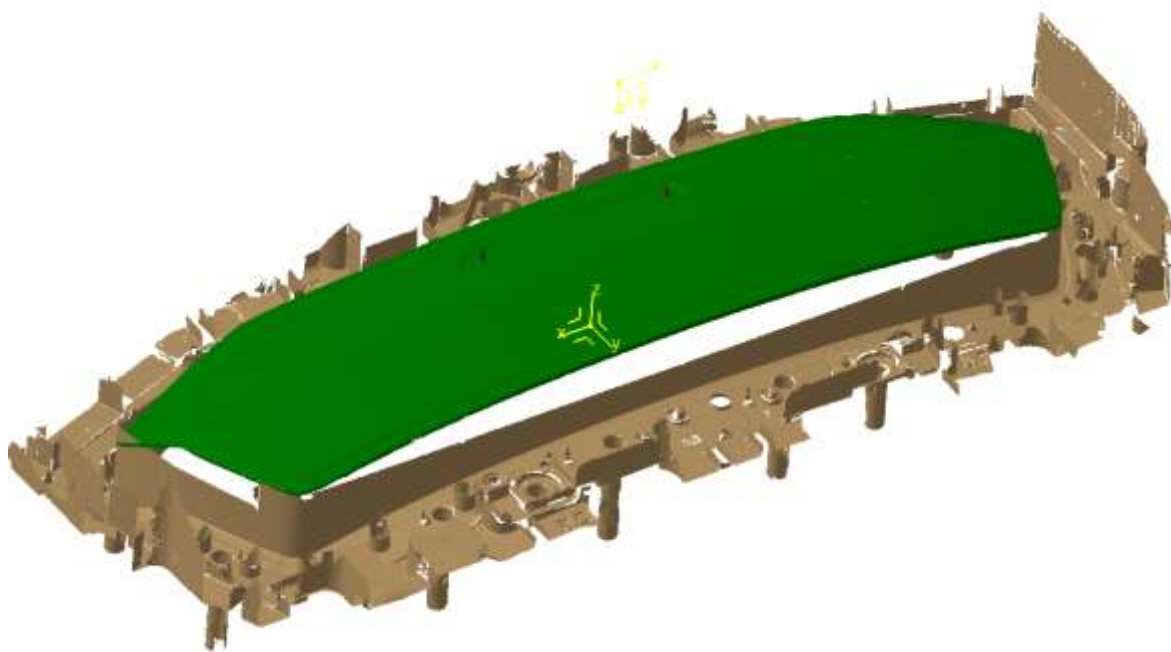
- **Nevhodná analýza odpružení** – běžně je využívána analýza „volného odpružení“, která pro svůj výpočet nezohledňuje gravitaci a upnutí dílu do přípravku. Pro přesnější analýzu je potřeba volit metodu analýzy odpružení, která nabízí analýzu s vlivem gravitace (např. metoda „Constrained Springback“, tzn. omezené pnutí), tak jako je tomu v praxi, kde gravitace a upnutí dílu hrají důležitou roli.
- **Obecně definované mechanické vlastnosti použitého materiálu** – v praxi je běžné setkat se s dodávaným materiálem do lisovacího procesu v rozmezí, které je definované příslušnou normou nebo materiálovým listem. V numerické simulaci se tento faktor bere na vědomí jen zřídka a počítá se s pevnou hodnotou mechanických vlastností. Z toho důvodu je simulovat lisování se spodními a horními podmínkami z hlediska mechanických vlastností použitého materiálu.
- **Střížné operace prováděny virtuálním ořezem** – většina střížných operací prováděna funkcí „cutting only“ (bez použití sevření nástrojů, stříhání bez klínu). Pro simulování reálného lisovacího procesu je doporučeno používat funkci typu „cutting with tools“ (polohování dílu, sevření nástrojů a stříhání klínem).
- **Zanedbání vliv rychlosti deformace a teploty** – jen minimálně se v metodickém plánování procesu uvažuje vliv rychlosti deformace a teploty. Důvodem je zejména absence materiálových modelů s nadefinovanou křivkou zpevnění pro různé rychlosti deformace a různé teploty. Pro přesnou analýzu odpružení by měly být používány takové materiálové modely, které tyto podmínky popisují, např. od firmy Tata Steel.

Již v počátcích metodického plánování lisovacího procesu, resp. návrhu numerické simulace (první uvolněné stavy dílů, cca 2 roky před začátkem výroby) by nemělo docházet ke zjednodušování výše zmíněných podmínek výpočtu numerické simulace. Z tohoto důvodu byl v rámci dizertační práce navržen „**kontrolní list numerické simulace**“ (viz příloha 1), který má za cíl poskytnout nástroj, s jehož pomocí bude možné již v počátcích metodického plánování vhodně nastavit numerickou simulaci s ohledem na budoucí analýzu a kompenzaci odpružení. V navrženém kontrolním listu jsou uvedeny všechny důležité parametry a podmínky, které je potřeba v průběhu nastavení kriticky dodržet. Výsledkem je zlepšení přesnosti analýzy odpružení v rámci numerické simulace. [P2, P8]

7.1.3 Poloha dílu při analýze odpružení

Jednou z dalších dílčích částí dizertační práce, které byla věnována podstatná část, byla problematika polohování dílu při analýze odpružení. Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, vliv gravitace hraje u analýzy odpružení velmi důležitou roli. V praxi se lze setkat nejčastěji s dvěma přístupy:

Metoda WZL (z n. j. Werkzeuglage) - V prvním případě se k problematice analýzy odpružení přistupuje vyhodnocením odpružení **v poloze poslední lisovací operace** a to přímo na nástroji nebo upnutím do upínek v předem definovaných pozicích dle RPS bodů. V případě analýzy odpružení v poloze lisovací operace je výlisk výrazně ovlivněn gravitací. U výlisku tak dochází nejčastěji k průhybu ve středu výlisku. Jednou z možností jak vyhodnotit výlisk přímo v lisovacím procesu, je jeho naskenování přímo v nástrojích (obr. 7.4). [P9]



Obrázek 7.4 – Sken výlisku spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca (označený zelenou barvou) na zvedačích po tažné operaci (zobrazený v izometrickém pohledu a ve směru osy y). [P9]

Metoda FZL (z n. j. Fahrzeuglage) - Druhý přístup se zaměřuje na analýzu odpružení výlisku **v poloze na voze** (jako je tomu přímo na voze na obr. 7.5). I v tomto případě dochází k ovlivnění velikosti odpružení gravitací výlisku, ovšem jen u dílů s konečnou vodorovnou polohou v zástavbě karoserie (kapota či střecha). Většina dílů je ve svislé poloze a jsou gravitací ovlivněny méně (páté dveře spodní a horní, postranice, blatník, atd.).

Tento přístup analýzy odpružení více odpovídá konečné poloze a funkci dílu a také skutečné geometrické změně. Nastavení této metody z pohledu měření (virtuálním či reálným) je ovšem problematické. Musí být vyřešeno zafixování výlisku ve všech směrech (x, y, z) aby nedošlo k posunutí. Reálně se často jedná o více jak 6 upínek, tím se do výlisku vnáší určité pnutí, které zamezuje výlisku správné volnosti při odpružení.

Ideální počet upínek byl v na základě provedené rešerše stanoven na 3-6. [P9]

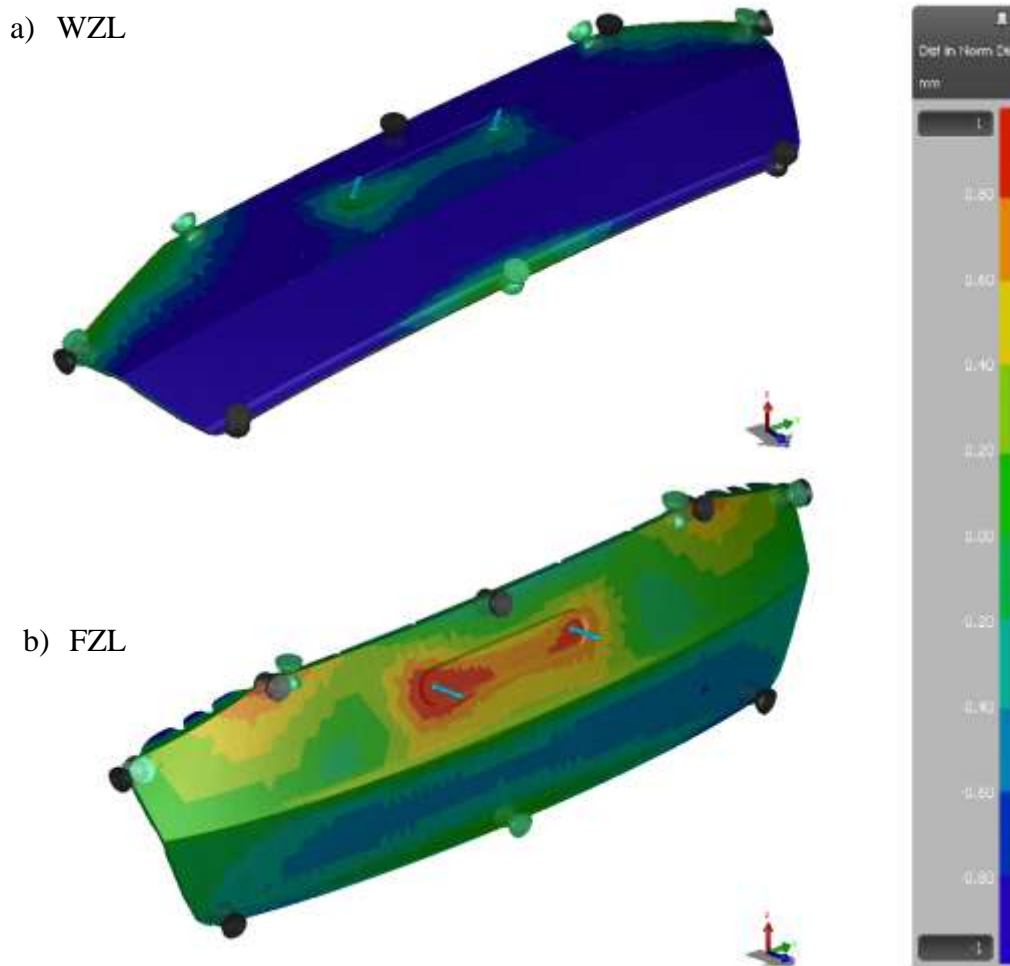


Obrázek 7.5 – Ukázka polohy dílu v absolutní poloze na voze. Díl HKau vozu SEAT Ateca zvýrazněn zelenou barvou.

Pro porovnání vlivu gravitace, resp. polohy při měření na analýzu odpružení bylo provedeno porovnání dílu spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca ve dvou různých polohách (obr. 7.6). Jedná se o polohy:

- a) Poloha analýzy **WZL** - v pozici poslední lisovací operace – $X, Y, Z = 0, 88, 0^\circ$
- b) Poloha analýzy **FZL** - v poloze dílu na voze – $X, Y, Z = 0, 0, 0^\circ$

V případě měření odpružení výlisku v poloze totožné s poslední lisovací operací došlo ke značnému ovlivnění odpružení vlastní vahou výlisku. Mimo místa v okolí upínek se výlisk v celém průřezu propadal vlivem gravitace. Jednalo se o geometrickou změnu až do 2,5 mm. Naopak v případě druhém, při ustavení výlisku do měřicí polohy, která je totožná s polohou výlisku na voze, již k ovlivnění gravitací nedošlo a měření vykazuje reálnější hodnoty.



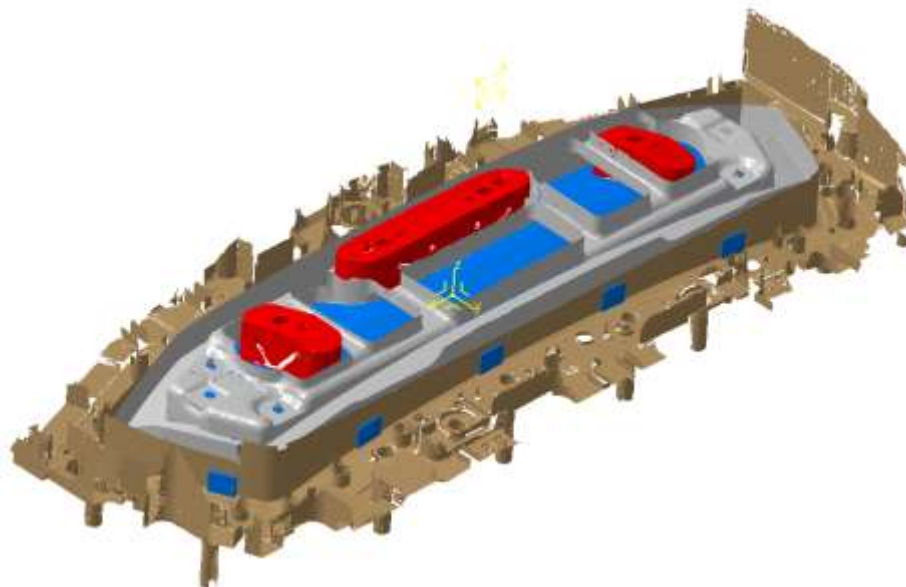
Obrázek 7.6 – Porovnání dvou různých poloh při analýze odpružení (a) poloha WZL - poslední lisovací operace, b) poloha FZL - totožná s dílem na vozu [P9]

Toto zjištění je významné zejména u dílů jednoduchého tvaru s minimálním deformačním zpevněním, jedná se např. o kapotu či střechu vozu. Ovšem tyto díly jsou vyráběny spíše z vysokopevných materiálů o větší tloušťce plechu. Ovlivnění gravitací nemusí být tak velké vzhledem k vlastní tuhosti dílu. Konkrétní díl je vyroben z plechu o $t=0,7$ mm a z nízkoúhlíkového materiálu o malé pevnosti. Celková šířka plechu 1260 mm v tomto případě hraje spolu s gravitací velkou roli. Při analýze odpružení je potřeba se zaměřit na ovlivnění celkové přesnosti analýzy odpružení díky gravitaci dílu.

7.1.4 Problematika vlivu gravitace dílu při analýze odpružení

Pro ověření vlivu gravitace na přesnost analýzy odpružení byl proveden experiment na díle vnějších spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca (HKau). Cílem experimentu bylo zjistit, do jaké míry je přesná analýza odpružení v numerické simulaci při vodorovné poloze dílu. Po odlisování dílu v operaci OP20, byl výlisek naskenován na části nástroje, která se v praxi označuje jako „zvedač“ (na obr. 7.7 červená barva).

Výlisek byl na konci operace nadzvednut o cca 10 cm, tak aby neseděl celou plochou na nástroji, ale jen ve styčných plochách. Na obr. 7.8 je na zvedačích zelenou barvou zobrazen naskenovaný výlisek.

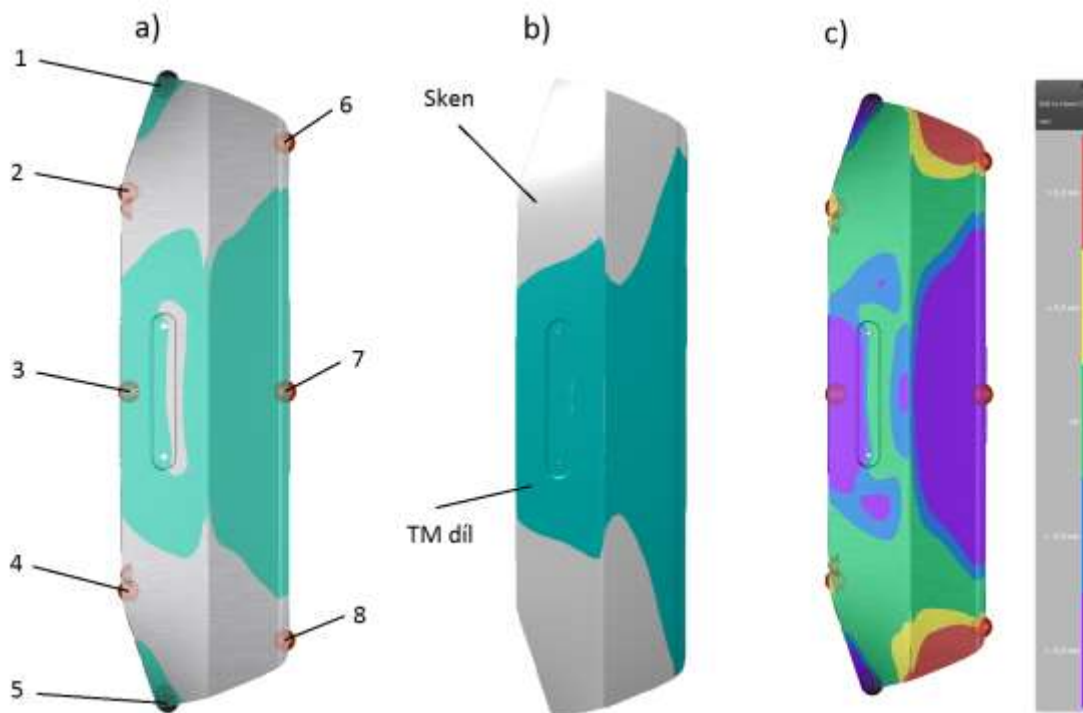


Obrázek 7.7 – Sken nástroje bez uloženého výlisku. Podle barvy: červená – zvedač, modrá – nástavek, šedivá – přídržovací systém, hnědá – vložky.



Obrázek 7.8 – Sken výlisku spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca (označený zelenou barvou) na zvedačích po tažné operaci (zobrazený v izometrickém pohledu a ve směru osy y). [P7]

V rámci experimentu bylo provedeno nastavení numerické simulace tak, aby se co nejlíže podobala skutečnému lisovacímu procesu a skutečné analýze odpružení. Pro numerickou simulaci byly použity parametry lisovacího procesu zobrazené v tab. 4 (metoda nastavení sítě - FV). Pro nastavení polohy virtuální analýzy byly do numerické simulace importovány naskenované části nástrojů (zvedače) a nastaveny do stejné polohy jako ve skutečnosti. Pro virtuální analýzu odpružení byla použita funkce reálného měření (z angl. „Real measurement“), které ve výpočtu analyzuje také gravitaci dílu. Výlisek pátých dveří byl při této analýze ve vodorovné poloze na zvedačích a nebyl jiným způsobem upnut. Při analýze odpružení byla jako referenční geometrie zvolena naskenovaná geometrie výlisku. [P7]



Obrázek 7.9 – Analýza odpružení v normálovém směru na díle spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca se zaměřením na analýzu gravitace při porovnání skenu reálného výlisku a numerické simulace. (a) Díl z numerické simulace, b) Sken zobrazený v SW Catia, c) Porovnání skenu a num. simulace). [P7]

Z analýzy zobrazené na obr. 7.9 je patrné, že skenovaný díl a virtuální analýza odpružení v numerické simulaci se neshodují. Skenovaný díl se v realitě deformoval spíše na bočních stranách, cca o 0,9 mm. Naopak virtuální analýza vykázala větší deformaci výlisku ve střední části, kde docházelo k rozdílům o cca 1 mm. Přesně naměřené hodnoty v předem definovaných polohách RPS bodů jsou znázorněny v tabulce 5.

Tabulka 5 – Normálové odpružení vzhledem k referenční geometrii měřená v RPS bodech: [P7]

Analýza odpružení v RPS bodech	Odpružení v normálovém směru vzhledem k TM dílu[mm]		Vzájemné porovnání Num. Simulace a skenu
	Num. Simulace	Sken	
1	-1,73	-1,3	0,43
2	-0,24	-0,62	0,38
3	-0,12	1,31	1,43
4	-0,15	-0,51	0,36
5	-1,82	-1,02	0,80
6	1,04	-0,42	1,46
7	0,62	1,85	1,23
8	1,35	-0,28	1,63

Z tabulky 5 je zjevný značný rozdíl mezi analýzou odpružení numerické simulace a naskenovaného vylisovaného dílu. Analýza odpružení se v obou případech shoduje pouze ve směru odpružení. I u tak jednoduchého dílu dochází k odpružení typu „twist“, kdy se celý výlisek kroutí na jedné straně do kladného a na druhé straně do záporného směru. A i přes symetrický díl se odpružení symetricky nechová, naopak rozdíly jsou značné, viz body 1. a 5., či body 6. a 8. Vzájemně se numerická simulace a naskenovaný výlisek rozcházejí např. v krajních oblastech o ± 1 mm. [P7], [P11]

7.2 Návrh standardů pro nastavení numerické simulace

Jednou z dílčích částí pro tvorbu závěrečné metodiky, bylo řešení standardizace nastavení numerické simulace. Jak již bylo popsáno a ověřeno v kapitole 6.3 - *Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu*, vstupní nastavení numerické simulace, zejména výpočetní síť MKP, je pro analýzu a kompenzaci odpružení velmi důležité. Nejedná se ovšem jen o nastavení výpočetní sítě, jedná se také o sjednocení nástrojů pro konečné vyhodnocení odpružení (rozmezí na měřicí škále, nastavení měřících upínek, použité nástroje pro vyhodnocení, aj.). V rámci metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení byly navrženy vhodné standardy, které bude mít specialista k ruce při návrhu lisovacího procesu pomocí numerické simulace.

Standardy byly vygenerované ve formě **.xml** souborů a je možné je kdykoliv upravit na základě nových zkušeností a zároveň je možné je přenést do jiných simulačních programů. Navržené standardy lze seskupit do třech hlavních kategorií: [P6]

- a) *Nastavení výpočetní sítě MKP*
- b) *Nastavení procesu lisování*
- c) *Nastavení vyhodnocovacích nástrojů*

7.2.1 Nastavení výpočetní sítě MKP

Jak bylo popsáno v kapitole 6.3 - *Experiment závislosti nastavení výpočtové sítě numerické simulace na přesnost výpočtu*, správné nastavení výpočetní sítě je pro přesné výsledky důležité a to nejen z pohledu analýzy odpružení, ale z pohledu celkové tvařitelnosti výlisku. Do tabulky 6 byly sepsány jednotlivé parametry, které jsou v navrženém standardu numerické simulace zahrnuty.

Tabulka 6 – Nastavení parametrů výpočetní sítě ve standardu. [P6]

Parametr	Hodnota
Tolerance a nastavení	
Vzdálenost stehů sítě	0,50 mm
Tolerance zasítování	0,05 mm
Max. velikost elementu	30,00 mm
Limity zpětné deformace	
Bezpečná	3°
Okrajová	0°
Spodní	-10°
Zaokrouhlení hodnot elementu	
Pozice	10°
Rotace	1°
Sklon	5°
Přesnost výpočetní sítě	
Penetrace hrany	0,22 mm
Max. úhel elementu	22,5°
Max. úroveň zpřesnění	6
Velikost řídicího elementu	20,00 mm
Řízení časového kroku	
Max. posun materiálu	2,20 mm
Min. posun nástrojů	2,00 mm
Max. posun nástrojů	5,50 mm
Konečný krok posunu nástrojů	0,40 mm
Typ elementu pro tváření	EPS-11
Tolerance konvergence	0,5
Penetrace hranice elementu	0,11 mm

7.2.2 Nastavení procesu lisování

Důležitou částí nastavení numerické simulace je definování podmínek virtuálního lisovacího procesu, který by měl vždy odpovídat možnostem skutečného lisovacího procesu. Jedná se zejména o vyrobitelnost dílu, tedy za jakých výsledných podmínek je ještě možné díl vyrobit. Tabulka 7 popisuje parametry procesu, které byly v rámci standardu definovány. Parametry popsané v tabulce 7 byly stanoveny na základě provedené rešerše a konzultace se specialisty v oboru výroby lisovacího nářadí.

Tabulka 7 – parametry lisovacího procesu upravené navrženým standardem. [P6]

Parametr	Hodnota
Limity pro tažné nástroje	
Max. úhlová odchylka	15°
Max. délka	70,0 mm
Min. délka	4,00 mm
Max. vnější délka	380,00 mm
Max. úroveň odchytky	20,00 mm
Max. rotace	5°
Limity pro střížné toleranci	
Úhel přístříhu - bezpečný	12°
Úhel přístříhu - okrajový	15°
Úhel stříhu - bezpečný	13°
Úhel stříhu - okrajový	10°
Průměr velikosti odpadu - bezpečný	550,00 mm
Průměr velikosti odpadu - okrajový	600,00 mm
Parametrizace nástrojů	
Mód parametrizace	Automatická
Hodnota parametrizace	0,0887 %

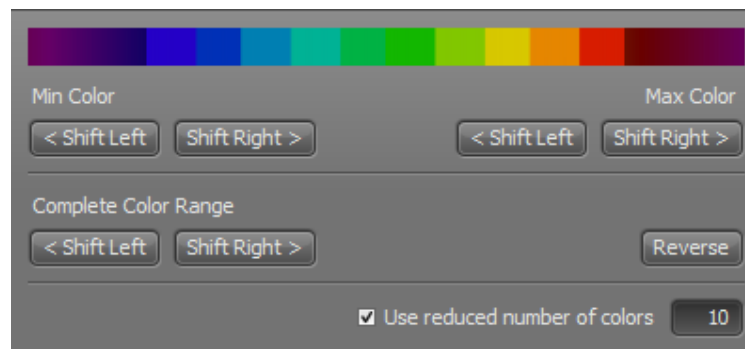
7.2.3 Nastavení pomocných nástrojů pro vyhodnocení velikosti odpružení

Standardizovat bylo také potřeba pomocné nástroje, které jsou k analýze odpružení využívány. Důvodem bylo, aby při návrhu metodického plánu nebyly používány vlastní postupy pro vyhodnocení odpružení a nedocházelo tak u každého projektu k rozdílným výsledkům. Pro vyhodnocení odpružení je důležitá zejména přehlednost zobrazení analýzy, k tomu je možné použít několik nástrojů. Nejvhodnějším nástrojem je zobrazení pomocí diskrétní a kontinuální škály. V obou případech je možné nastavit libovolné barevné zobrazení. Obrázek 7.10 zobrazuje navrženou diskrétní škálu a obrázek 7.11 potom škálu kontinuální.

Může se zdát, že přehlednost analýzy odpružení nehraje v konečné fázi takovou roli. Ovšem jak bylo zmíněno, při využití numerické simulace je možné využít vlastních postupů během definování virtuálního lisovacího procesu, které následně vedou k tvorbě chyb. Do těchto postupů lze jednoznačně zařadit také konečnou vizualizaci analýzy odpružení.



Obrázek 7.10 –Navržená diskrétní škála pro zobrazení analýzy odpružení. [P6]



Obrázek 7.11 –Navržená kontinuální škála pro zobrazení analýzy odpružení. [P6]

Navržený standard se nezaměřuje jen na vyhodnocení odpružení, ale na vyhodnocení numerické simulace celkově, tedy i z pohledu robustnosti lisovacího procesu. Jedním z dalších parametrů, které jsou v rámci standardu definovány je parametr tvařitelnosti. Tvařitelnost je v tomto případě definována jako velikost ztenčení materiálu. Doporučuje se dosáhnout minimální hodnoty ztenčení plechu o 3% a nepřesáhnout maximální hodnotu ztenčení o 25% z původní tloušťky plechu. Při ztenčení materiálu, které přesahuje hodnotu 25% z původní tloušťky, má materiál tendenci lokálně vyčerpávat plasticitu materiálu. V takovém případě může dojít ke vzniku trhliny materiálu. [P6], [P7]

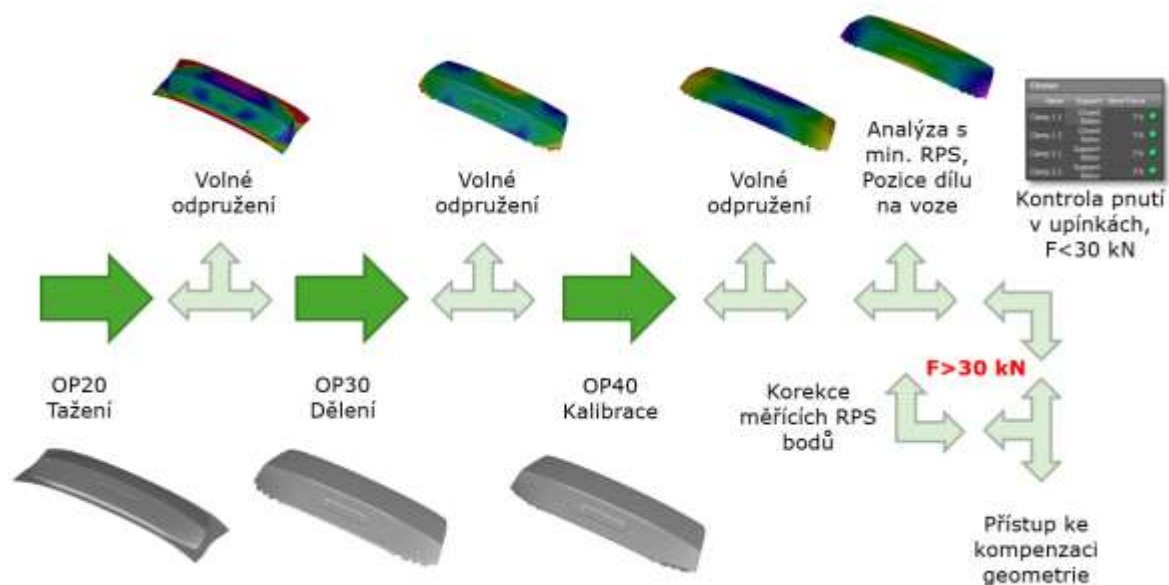
7.3 Návrh metodiky analýzy odpružení

Na základě výše popsané problematiky analýzy odpružení byla navržena metodika, určená pro zpřesnění současného stavu vyhodnocení odpružení pomocí numerické simulace. V navržené metodice byl kladen důraz zejména na metodu měření, vliv gravitace při analýze a na polohu dílu při měření odpružení. Navržená metodika pro analýzu odpružení je popsána v tabulce 8 a znázorněna pomocí schématu na obr. 7.12. [P7]

Tabulka 8 – popis metodiky analýzy odpružení. [P7]

Nastavení numerické simulace
<ul style="list-style-type: none">Nastavení lisovacího procesu podle navržených standardů a doporučení (viz kapitola 7.2)
Operace tažení
Mezioperační volné odpružení
<ul style="list-style-type: none">Odpružení polohováno do souřadného systému tažné operace
Střížná operace
Mezioperační volné odpružení
<ul style="list-style-type: none">Odpružení polohováno do souřadného systému střížné operace
Kalibrovací a střížná operace
Volné odpružení
<ul style="list-style-type: none">Odpružení polohováno do souřadného systému poslední lisovací operace
Hlavní analýza odpružení
<ul style="list-style-type: none">Analýza odpružení pomocí funkce „Constrained Springback“ (analýza odpružení včetně upnutého výlisku)Odpružení polohováno v absolutním souřadném systému vozuVýlisek upnout do předem navržených hlavních RPS bodů
Kontrola rozměrové přesnosti výlisku
<ul style="list-style-type: none">Snaha o dodržení přesnosti s tolerancí do 0,8 mm
Kontrola velikostí pnutí výlisku v oblasti upínek
<ul style="list-style-type: none">Síla, která působí na upínku nesmí přesáhnout 30 kN
V případě, že není dodržena velikost pnutí v upínkách, se doporučuje změnit strategii upnutí výlisku
<ul style="list-style-type: none">Redukovat počet upínek, do kterých je díl upnutDoporučení je využít upnutí do 3-4 upínek
Opakovat analýzu odpružení pomocí funkce „Constrained Springback“
V případě, že není splněna rozměrová přesnost dílu, je možné přistoupit ke kompenzaci odpružení

Navržená metodika pro nastavení numerické simulace a pro analýzu odpružení (obr. 7.12) byla ověřována na skutečných dílech. Jedná se o vybrané díly z jednotlivých tříd složitosti, které jsou popsány v kapitole 5. *Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely*. Ověření analýzy odpružení na vybraných dílech je popsáno spolu s ověřením metodiky pro kompenzaci odpružení v kapitole 9.2 *Ověření metodiky kompenzace odpružení*. [P7]



Obrázek 7.12 – Schéma metodiky pro přesnou virtuální analýzu odpružení s využitím numerické simulace. [P7]

8. Analýza okrajových podmínek se zaměřením na problematiku odpružení

V kapitole 2.6 *Analýza okrajových podmínek* byla popsána problematika většiny z okrajových podmínek lisovacího procesu a jejich návaznost na problematiku odpružení. Problematikou vlivu okrajových podmínek na velikost odpružení se zabývala řada autorů. Většina odborných prací problematiku odpružení sleduje jen z pohledu jednotlivých okrajových podmínek. Jen málo odborníků se zabývalo problematikou komplexně. V praxi okrajové podmínky působí společně a vzájemně se ovlivňují. Jejich návaznost na problematiku odpružení se tak může projevit vzájemnými vztahy a může dojít k výraznému zhoršení, ale i ke zlepšení. Pro návrh vhodné metodiky, která povede ke snížení odpružení v lisovacích procesech, je tedy potřebné se problematikou okrajových podmínek zabývat podrobněji. [41]

8.1 Optimalizace procesu s využitím speciálního výpočtového modulu SIGMA

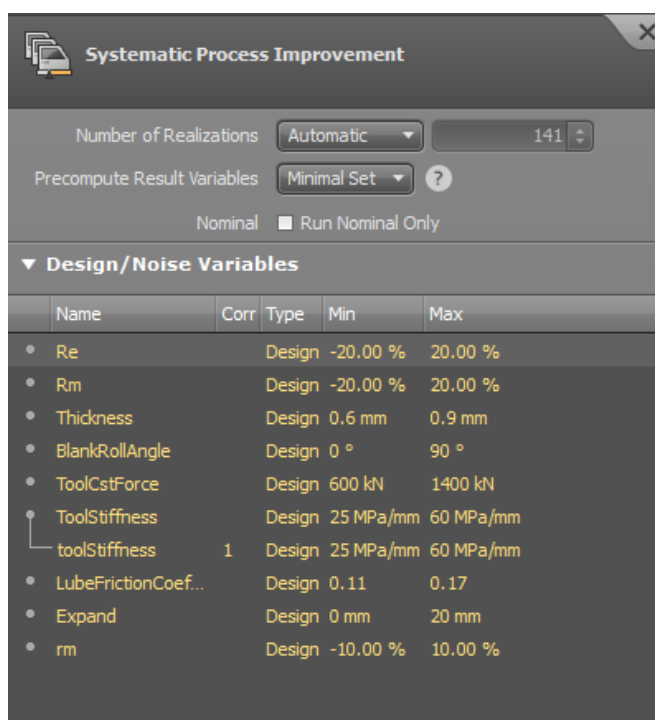
Pro vybraný díl vnějších spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca bylo v následující části práce podrobně analyzováno odpružení v tažné operaci s ohledem na vliv okrajových podmínek. Pro analýzu byl využit speciální výpočtový modul AutoForm Sigma, který umožňuje provádět stochastický výpočet na základě vložených informací v podobě rozmezí parametrů lisovacího procesu. Na základě výpočtu (podobné výpočty často trvají více jak 24 hodin) lze nejen analyzovat vliv jednotlivých okrajových podmínek na výsledný lisovací proces, ale lze také sledovat vzájemné chování a ovlivňování jednotlivých parametrů. V tabulce 9 jsou vypsány okrajové podmínky, které byly v rámci experimentu nastaveny v numerické simulaci a dále sledovány. [P2]

Tabulka 9 – Sledované okrajové podmínky v numerické simulaci a jejich rozhraní [P2]

Procesní okrajové podmínky				
Parametr	Jednotky	Standartní hodnota	Spodní hranice	Horní hranice
Koeficient tření	[-]	0,15	0,11	0,17
Tuhost nástrojů	[MPa/mm]	50	25	60
Přidržovací síla	[kN]	950	600	1400
Směr válcování	[°]	0	0	90
Tloušťka plechu	[mm]	0,7	0,6	0,9
Velikost přístříhu	[mm]	1430x170	1430x170	1450x190
Materiálové vlastnosti				
R_e	[MPa]	151	120	180
R_m	[MPa]	294	235	350
Anizotropie materiálu	[-]	1,83	1,65	2,18

Na základě provedeného nastavení výpočtového modulu Sigma byl následně proveden statistický výpočet počtu simulací, aby bylo dosaženo výpočtu všech kombinací, dostačujících pro popis celého procesu. Na obr. 8.1 je zobrazeno nastavení modulu Sigma v programu AutoForm. Pro takto nastavenou numerickou simulaci bylo provedeno 141 výpočtů (Number of Realizations). Pro představu, pro tento jednoduchý díl trvá výpočet jedné numerické simulace tažné operace přibližně 20 minut. Výpočet všech kombinací zabral přibližně 40 hodin (některé simulace byly ukončeny dříve, jelikož došlo např. k porušení materiálu během tažného procesu a výpočet byl tak včas ukončen). V případě dílů se složitější geometrií by se jednalo o časově náročnější proces. Navíc se jednalo jen o minimální nastavení variabilních výsledků (z angl. Minimal Set). Při nastavení na maximální nastavení (z angl. All Variables) by výpočet trval exponenciálně déle.

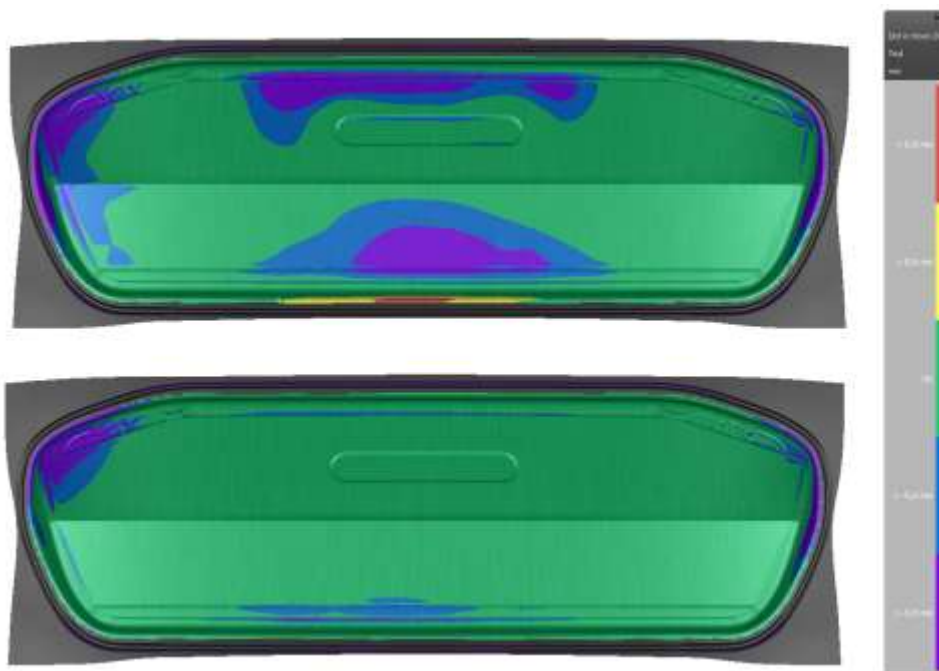
Obrázek 8.1 – Nastavení výpočtového modulu AutoForm Sigma pro analýzu okrajových podmínek a jejich návaznost na velikost odpružení. [P2]



Výhodou podobných výpočtových modulů je, že je lze využít na nalezení ideálních okrajových podmínek pro co nejmenší velikost odpružení. Podobně tomu bylo v případě tohoto experimentu. [P2] Tabulka 10 a obr. 8.2 zobrazují porovnání standartních hodnot, které byly nastaveny v původní metodě a optimálních výsledků pro nejmenší nalezené odpružení dílu. Problém této metody nastává při aplikaci do praxe, kde nelze dosáhnout konstantních ideálních podmínek. Dodavatel materiálu nezaručí stabilní dodání materiálu s konstantními hodnotami mechanických vlastností. Také velikost tření nebude stále konstantní vlivem měnící se teploty v procesu.

Tabulka 10 – Hodnoty optimálního nastavení vstupních parametrů numerické simulace [P2]

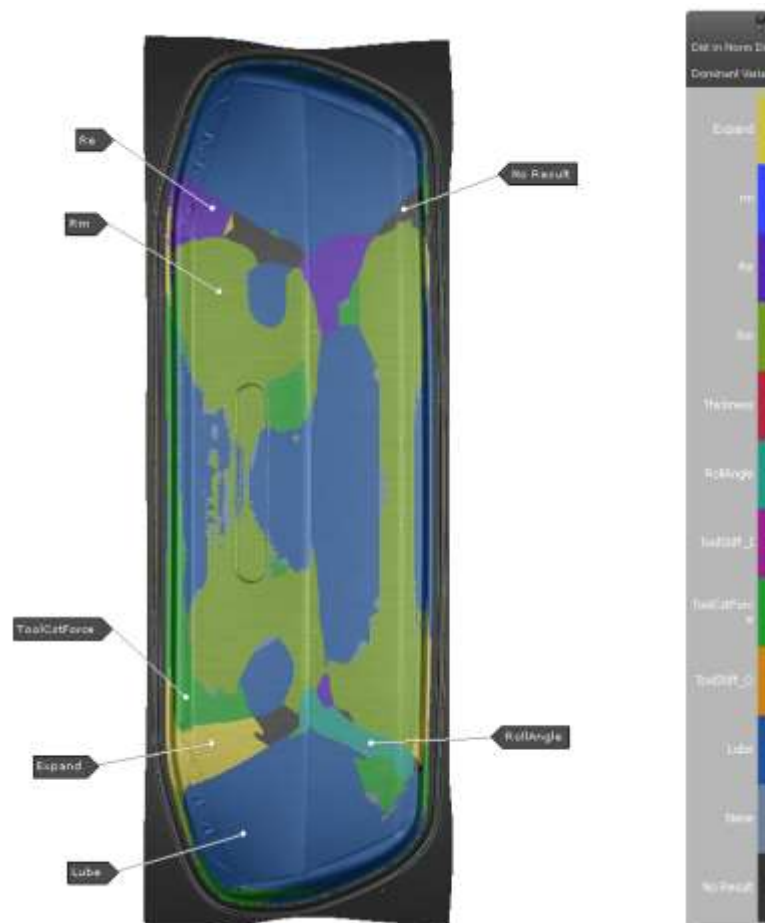
Procesní okrajové podmínky			
Parametr	Jednotky	Standartní hodnota	Optimální hodnoty
Koeficient tření	[-]	0,15	0,166
Tuhost nástrojů	[MPa/mm]	50	50
Přidržovací síla	[kN]	950	600
Směr válcování	[°]	0	0
Tloušťka plechu	[mm]	0,7	0,68
Velikost přístříhu	[mm]	1430x170	1438x178
Materiálové vlastnosti			
R_e	[MPa]	151	121
R_m	[MPa]	294	255
Anizotropie materiálu r	[-]	1,83	1,95



Obrázek 8.2 – Porovnání analýzy odpružení v normálovém směru: a) Nominální nastavení, b) optimalizace pomocí výpočtového modulu SIGMA. [P2]

8.2 Vliv jednotlivých parametrů na velikost odpružení

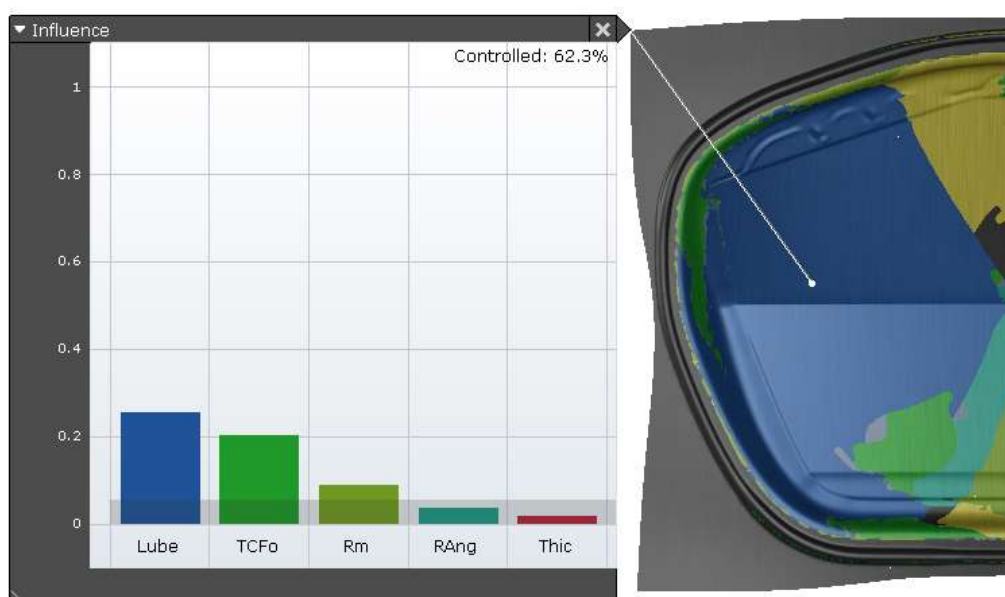
V následující kapitole jsou s ohledem na velikost odpružení porovnány okrajové podmínky popsané v kapitole 2.6 *Analýza okrajových podmínek*. Pomocí analýzy na obrázku 8.3 lze vyhodnotit zmapování vlivu jednotlivých parametrů na velikost odpružení výlisku (HKau, SEAT Ateca). Analýza zobrazuje parametry v různých barvách, ty označují oblasti s největším vlivem daného parametru. V daných oblastech působí na odpružení i ostatní parametry, ty ale nemají z hlediska odpružení takový význam. Analýza okrajových podmínek zřetelně poukazuje na složitost problematiky odpružení. V praxi nelze definovat univerzální řešení pro všechny výlisky. Vždy se bude výsledné odpružení lišit od vstupních parametrů a to zejména od typu výlisku, lisovacího procesu a od geometrie výlisku. U tvarově složitějších dílů lze velmi složitě určit, které parametry budou velikost odpružení ovlivňovat nejvíce. [P2]



Obrázek 8.3 – Mapová analýza výlisku HKau z pohledu vlivu okrajových podmínek na velikost odpružení. [P2]

Konkrétně u analyzovaného dílu pátých dveří se jako nejvíce dominantní parametr projevoval koeficient tření. K ovlivnění ovšem docházelo jen v krajních oblastech výlisku a v oblasti určené pro registrační značku vozu. Ve středové oblasti byl naopak dominantní parametr meze pevnosti R_m spolu s přídržovací silou. Zajímavé je zjištění, že na provedené analýze jednotlivých parametrů má tloušťka plechu málo významný vliv. I když o tloušťce plechu se dle teorie mluví jako o parametru, který velikost odpružení ovlivňuje výrazně.

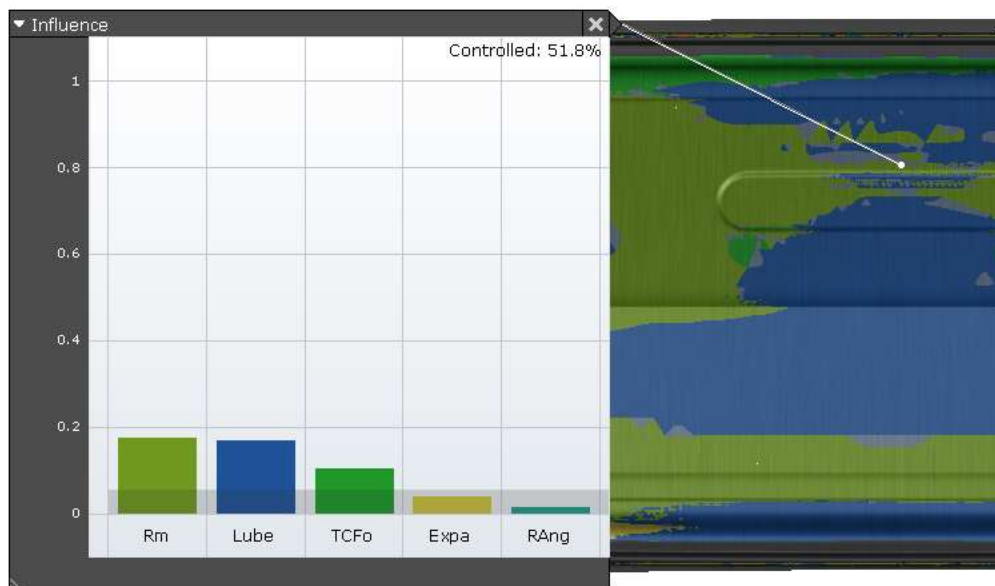
Obr. 8.4 a 8.5 zobrazují analýzu vlivu parametrů v konkrétní oblasti. Pro podrobnější porovnání vlivů byla vybrána krajní a středová oblast výlisku. V zobrazených diagramech bylo vyhodnoceno pět nejvýznamnějších parametrů pro danou oblast. Až na výjimky byl v celém průřezu výlisku nejvýraznějším parametrem koeficient tření spolu s mezí pevnosti R_m a velikostí přídržovací síly. Např. parametr meze pevnosti R_m potvrzuje předpoklad, který udává, že s klesající hodnotou R_m je velikost odpružení nižší. Také v ideálním nastavení parametrů s ohledem na snížení odpružení bylo s pomocí modulu Sigma R_m sníženo z 294 na 255 MPa. [P2]



Obrázek 8.4 – Porovnání vlivu jednotlivých parametrů na velikost odpružení v krajní oblasti výlisku. [P2]

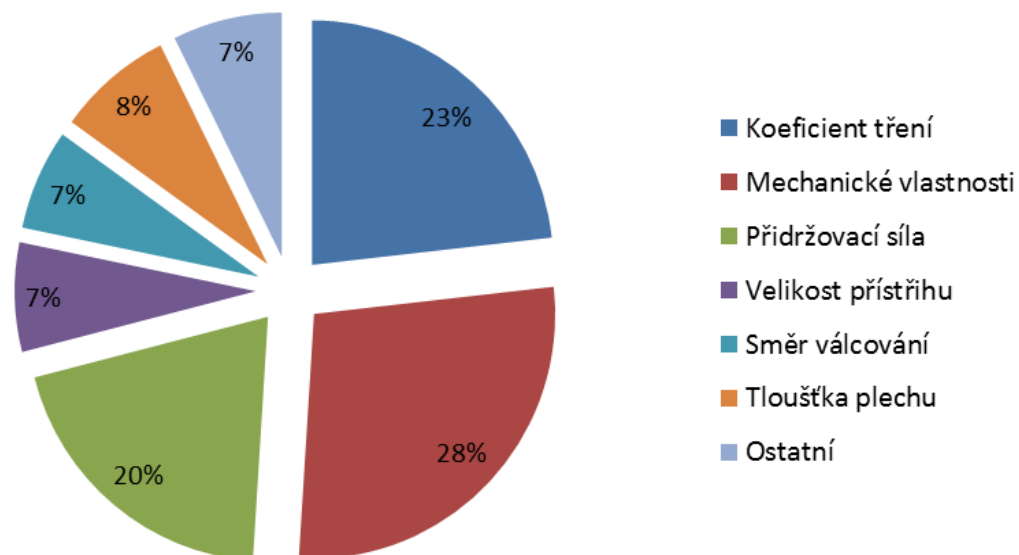
Koeficient tření spolu s přídržovací silou jsou z pohledu konečného efektu velmi podobné parametry. Oba parametry mají vliv na výsledné protažení materiálu, tedy na jeho deformaci. Velikost deformace se následně projevuje na konečné odpružení výlisku (čím větší deformace materiálu, tím nižší velikost odpružení).

V momentě, kdy není v lisovacím procesu možné ovlivnit koeficient tření dodatečným mazáním (např. z důvodu ekologických), je doporučeno zasáhnout do přidržovací síly, brzdících drážek, či do velikosti nástřihu.



Obrázek 8.5 – Porovnání vlivu jednotlivých parametrů na velikost odpružení ve středové oblasti výlisku. [P2]

V provedeném experimentu byla ověřena závislost procesních parametrů na velikost odpružení výlisku. Experiment byl aplikován v tažné operaci vnějšího spodního dílu pátých dveří vozu SEAT Ateca. Závěrem nelze jednoznačně říci, do jaké míry ovlivňuje jeden konkrétní parametr konečnou velikost odpružení, velmi záleží na tvarové složitosti. Na základě tohoto zjištění byl výlisek dále analyzován v deseti vybraných oblastech. Následně byl sestaven poměrový graf (obr. 8.6) závislosti konkrétních nastavených parametrů.



Obrázek 8.6 – Vliv okrajových podmínek na velikost odpružení. Hodnoty získané z analýzy vnějšího dílu pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P2]

Na základě výsledků z analýzy vlivu okrajových podmínek bylo zjištěno, že parametrem, který nejvíce ovlivňuje výslednou velikost odpružení, jsou mechanické vlastnosti (R_m , R_e a r). Následuje parametr koeficientu tření a velikost přidržovací síly. Významnost těchto tří parametrů se lišila podle různých oblastí ve výlisku. Ostatní parametry mají na základě provedené analýzy výrazně menší roli, jedná se hlavně o tloušťku plechu, velikost přístřihu a směr válcování. Zbylé parametry mají na výsledné odpružení velmi malou až žádnou roli. [42], [P2], [P7]

8.3 Nastavení numerické simulace s ohledem na okrajové podmínky lisovacího procesu

Experiment popsany v předchozí kapitole, poukázal na dominantní okrajové podmínky lisovacího procesu, které se problematiky odpružení týkají nejvíce (koeficient tření, mechanické vlastnosti materiálu, přidržovací síla, brzdny efekt brzdících drážek, aj.). S těmito podmínkami a s podmínkami týkající se technologičnosti konstrukce dílu je nutné v rámci navrhované metodiky také počítat. V kapitole je popsána část metodiky, která se zabývá optimálním nastavením numerické simulace z pohledu okrajových podmínek lisovacího procesu (viz tabulka 11).

Tabulka 11 – Obecné doporučení pro nastavení numerické simulace lisovacího procesu s cílem snížení odpružení materiálu. [48], [52], [P2]

Parametr	Kritérium pro nastavení	Podrobný popis
Obecné nastavení numerické simulace		
Poměr tažného rad. a tloušťky mat. R/t	< 2	Při vyšších hodnotách poměru nedochází k dostatečnému vypnutí materiálu
Tloušťka plechu	> 0,7 mm	Při nižších hodnotách tloušťky plechu vzniká problematika s dodržením rozměrové přesnosti
Koeficient tření (Coulombův koeficient)	0,14 - 0,16	Při nižších hodnotách koeficientu tření (<0,13) dochází ke zvlnění a vyššímu odpružení vzhledem k prokluzování mat.
Tuhost nástrojů v num. simulaci	> 30 MPa/mm	Nižší hodnoty lze využít jen u malých nástrojů (např. pro víko světel)
Nastavení brzdících drážek v num. simulaci	Adaptivní	Při použití konstantních brzdících drážek je výpočet numerické simulace méně přesný
Analýza numerické simulace		
Maximální porušení materiálu	< 0,8	Nad hodnotou maximálního porušení 0,8 hrozí vznik trhlin
Minimální ztenčení materiálu	> 0,03	Pokud materiál není ztenčen alespoň o 3%, nedošlo k dostatečnému přetvoření materiálu
Maximální ztenčení materiálu	< 0,25	Pokud se materiál ztenčí o více jak 25%, hrozí vznik trhlin a změna tuhosti dílu vzhledem k lokálnímu ztenčení

Aby bylo možné proces nastavení numerické simulace přehledně kontrolovat, byl v rámci metodiky sestaven **kontrolní list numerické simulace**, který zahrnuje posloupnost bodů a doporučení, které je nezbytné dodržet, viz kontrolní list, viz příloha 1.

Navržený kontrolní list je nástroj shrnující veškeré získané poznatky o problematice odpružení, resp. o okrajových podmínkách lisovacího procesu a nastavení výpočtové části v numerické simulaci. Kontrolní list byl vytvořen jako „živá tabulka“, ve které je možné během procesu sledovat, jaké body metodický plánovač při navrhování numerické simulace splnil a naopak. Pro demonstraci je část vyplněného kontrolního listu zobrazena na obr. 8.7. Na zobrazené ukázce lze např. vidět body označené červenou barvou, které nebyly při nastavení numerické simulace dodrženy. **Kompletní vyplněný kontrolní list na díl vnějších spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca je přiložen v příloze 1. [P2], [P7]**

Pre Processing:			
Import dat			
Informace o materiálu			
Požadovaný materiál:			
Požadovaná tloušťka materiálu:			
Import dat			
1 Tolerance & nastavení:			
1.1	- Meshing Tolerance [dle normy VW01170]	0,05 mm	
1.2	- Stitching distance [dle normy VW01170]	0,5 mm	
1.3	- Max Side Length [dle normy VW01170]	30 mm	
1.4	- Poměr rádius / tloušťka plechu [R/t < 2]	<input type="radio"/> Ne <input checked="" type="radio"/> Ano	
1.5	- Zasiřování (Mesh) v pořádku pro nástroj a plech?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	
1.6	- Pro vyhodnocení jsou použity standardy "Standard Evaluation"?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	
1.7	Typ symetrie - Je geometrie dílu plně symetrická? (např. tažení dvojčat)	<input checked="" type="radio"/> Ano	
1.8	- Je definována symetrie jako plný import + pomocná symetrie?	<input type="radio"/> Ne <input checked="" type="radio"/> Ano	*pro definici sym. list
1.9	Import CAD geometrie:		
1.10	- Data importována na základě aktuálního stavu (MK, MP, NCM)?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	
1.11	- Použita nominální geometrie [*bez žádné kompenzace či bombírování]?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	
1.12	- Všechny data importována v souřadnicích vozu?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	
1.13	- Importovány vlastní geometrie pro jednotlivé operace (jen pro jednu OP)?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	*nutné pro kompenzaci
1.14	- Importována jedna geometrie pro celou tahovou OP (master geometry)?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	*nutné pro kompenzaci
1.15	- Správná orientace geometrie [při pohledu shora viditelná lesklá barva]?	<input type="radio"/> O.K. <input checked="" type="radio"/> není O.K.	
Definování materiálu			
2 Materiálová data:			
2.I	- Materiál odpovídá požadovanému materiálu daného projektu?	<input type="radio"/> Ano <input checked="" type="radio"/> Ne	
2.II	- Materiálová data získána od?	<input checked="" type="radio"/> VW Konzern <input type="radio"/> AF	<input type="radio"/> Dodavatel mat.
2.III	Materiálová data příslušného rozmezí tloušťky?	<input checked="" type="radio"/> Ano <input type="radio"/> Ne	(např. pro t = 0,85 použít mat. 0,6 - 0,8 mm)
2.IV	Jsou použity svařované plechy? (Tailored blanks)	<input checked="" type="radio"/> Ne <input type="radio"/> Ano	<input type="checkbox"/> O.K.
Plán procesu			

Obrázek 8.7 – Část vyplněného kontrolního listu, který slouží jako nástroj pro návrh a zpětné vyhodnocení numerické simulace. [P7]

9. Metodika kompenzace odpružení

Hlavním cílem dizertační práce bylo navržení vhodné metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení velkoplošných karosářských dílů za pomoci numerické simulace. V předchozích kapitolách byla podrobně probírána problematika predikce a analýzy odpružení. Na základě dílčích experimentů byla navržena metodika pro analýzu odpružení v numerické simulaci (viz kapitola 7.3 *Návrh metodiky analýzy odpružení*). V případě, že je dodržena popsaná metodika analýzy odpružení a velikost odpružení přesahuje požadované hodnoty rozměrové přesnosti (u pohledových dílů aplikováno kritérium 0,8 mm obecně a 0,2 mm pro rozhodující plochy, např. dosedací plocha), je možné přistoupit ke kompenzaci odpružení.

Navržená metodika kompenzace odpružení je zaměřena na co nejefektivnější provedení kompenzace s využitím výpočtového, kompenzačního modulu. Potřeba využití numerické simulace ke kompenzaci odpružení vychází z neefektivní a časově náročné ruční kompenzace (desítky až stovky hodin, viz porovnání v kapitole 9.4 *Přínos navržené metodiky analýzy a kompenzace odpružení*). Problematika nastavení numerické simulace obecně již byla popsána v předchozích kapitolách. Samotné nastavení kompenzace odpružení a zvolení vhodné strategie je další částí problematiky. V případě kompenzace odpružení lze získat velmi rozdílné výsledky při nevhodném zadání parametrů. Z toho důvodu byla navržena metodika pro kompenzaci odpružení, která si klade za cíl sjednotit kompenzaci odpružení a zpřesnit její výsledky v návaznosti na reálný lisovací proces. [P7]

Souhrnná metodika kompenzace odpružení zahrnuje: [P7]

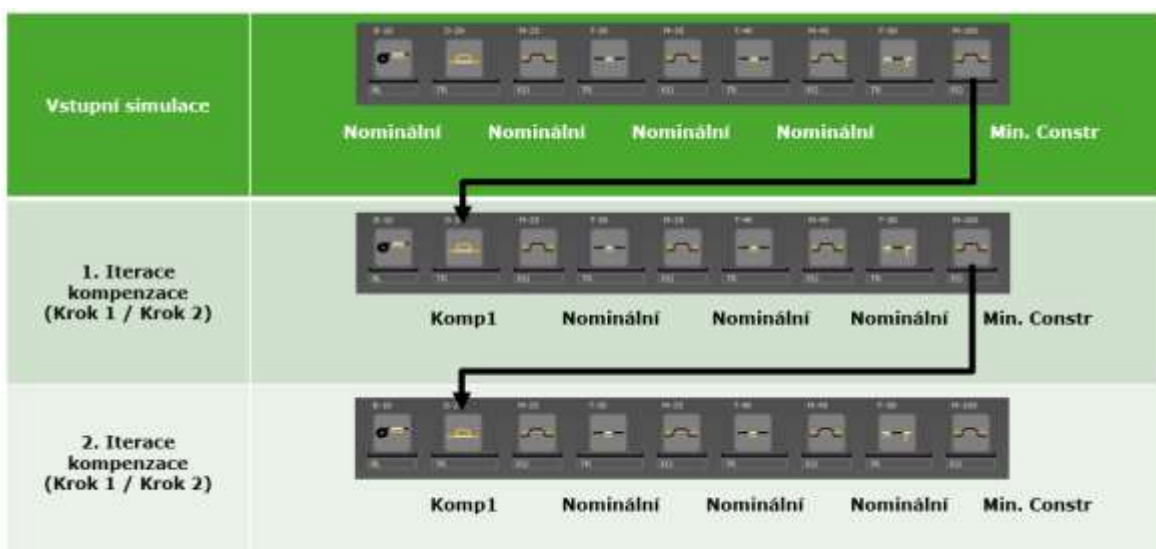
- Doporučení při návrhu dílu v prototypové fázi projektu
- Doporučení při návrhu tahového modelu
- Nastavení numerické simulace s ohledem na okrajové podmínky, které výsledné odpružení nejvíce ovlivňují
- Přístup k virtuální analýze odpružení
- Přístup ke kompenzaci odpružení

9.1 Návrh strategie pro kompenzaci odpružení

V případě kompenzace odpružení s využitím numerické simulace je velmi důležitým krokem volba vhodné strategie. Ta se zaměřuje na možné přístupy k problematice kompenzace odpružení. Lze dosáhnout velmi rozdílných výsledků v případě různých strategií. Strategií se v tomto případě rozumí volba kompenzované a referenční geometrie, jaké operace budou do kompenzace odpružení zahrnuty a s jakým kompenzačním faktorem bude kompenzace provedena. V případě čtyř operačního lisovacího procesu (tažení, střížné a kalibrovací operace, viz spodní páté dveře), lze např. uvažovat strategie následovně: [P7]

1. Strategie – kompenzace odpružení tažné operace (obr. 9.1)

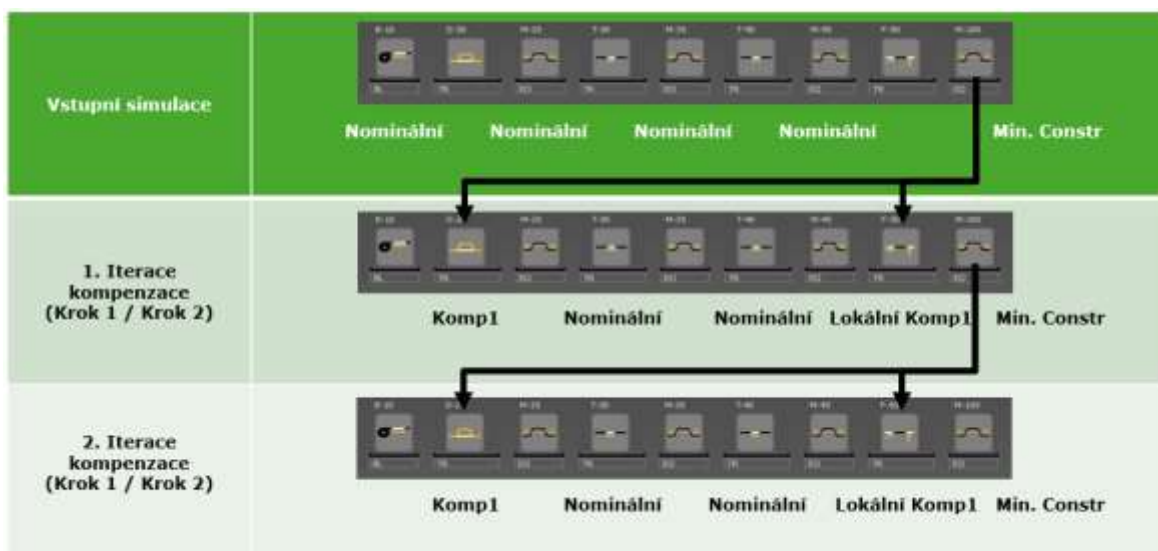
- Vstupní referenční geometrie pro kompenzaci – TM díl daný vývojem
- První iterace kompenzace provedena na základě analýzy odpružení ze vstupní simulace v poslední operaci
- V první iteraci provedena **kompenzace odpružení jen v tažné operaci OP20** na základě analýzy odpružení v nominální simulaci
- Geometrie ve střížných a v kalibrovací operaci **zůstává nekompenzována**
- Opakování stejné strategie v následných iteracích
- Provedení 2-4 iterací
- V případě, že kompenzace geometrie nemá na velikost odpružení vliv a není zřejmý zlepšující se trend, zvolit jinou strategii



Obrázek 9.1 – 1. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie pouze v tažné operaci. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7]

2. Strategie – kompenzace odpružení tažné a kalibrovací operace (obr. 9.2)

- Vstupní referenční geometrie pro kompenzaci – TM díl daný vývojem
- První iterace kompenzace provedena na základě analýzy odpružení ze vstupní simulace v poslední operaci
- V první iteraci provedena **kompenzace odpružení v operaci tažné OP20 a kalibrovací OP50** na základě analýzy odpružení v nominální simulaci
- Geometrie ve střížných operacích **zůstává nekompenzována**
- Opakování stejné strategie v následných iteracích
- Provedení 2-4 iterací
- V případě, že kompenzace geometrie nemá na velikost odpružení vliv a není zřejmý zlepšující se trend, zvolit jinou strategii

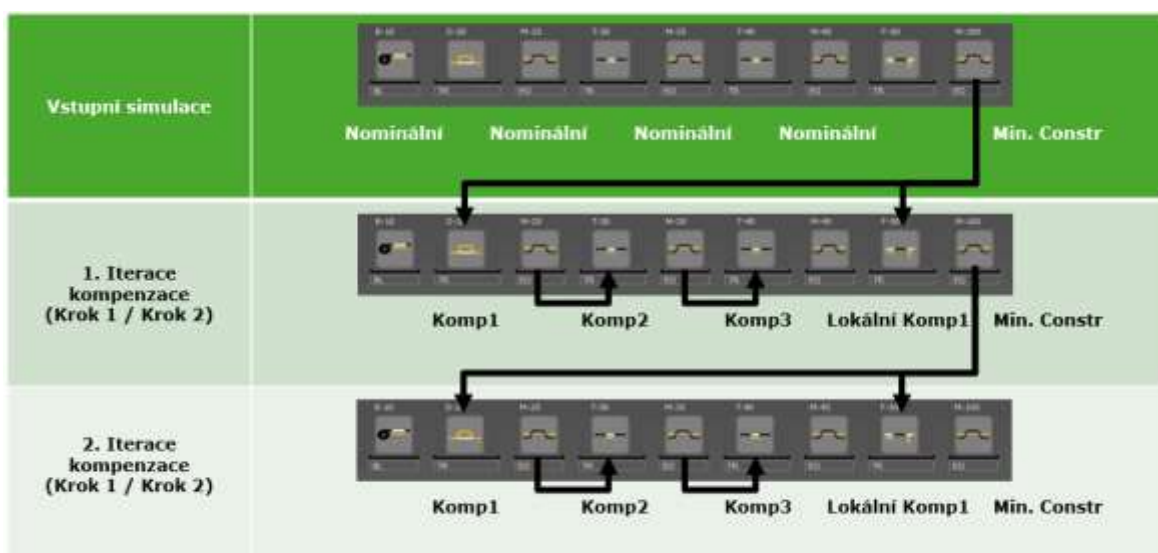


Obrázek 9.2 – 2. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie v tažné a následně kalibrovací operaci. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7]

3. Strategie – kompenzace odpružení všech lisovacích operací (obr. 9.3)

- Vstupní referenční geometrie pro kompenzaci – TM díl daný vývojem
- První iterace kompenzace provedena na základě analýzy odpružení ze vstupní simulace v poslední operaci
- V první iteraci provedena **kompenzace odpružení ve všech lisovacích operacích**
- Kompenzace odpružení u tažné a kalibrovací operace je provedena na základě analýzy odpružení z předchozí operace

- e. Kompenzace odpružení ve střížných operacích je provedena na základě analýzy odpružení v rámci aktuální iterační smyčky
- f. Opakování stejné strategie v následných iteracích
- g. Provedení 2-4 iterací
- h. V případě, že kompenzace geometrie nemá na velikost odpružení vliv a není zřejmý zlepšující se trend, zvolit jinou strategii



Obrázek 9.3 – 3. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie ve všech lisovacích operacích, včetně střížných. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7]

9.2 Ověření metodiky kompenzace odpružení

Značná část dizertační práce byla zaměřena na popsání problematiky odpružení, její analýzy a kompenzace. Na základě získaných poznatků pomocí teoretické rešerše a vlastních experimentů, bylo sestaveno modifikované řešení, včetně metodiky s cílem zajištění přesnější analýzy a kompenzace odpružení. Navržené modifikované řešení bylo následně ověřováno z pohledu přesnosti a celkové účinnosti ve využití v praxi. Ověření metodiky bylo provedeno na lisovacím procesu vybraných dílů, ty jsou podrobně popsány v kapitole 5. *Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely.* Jedná se o díly vozů: [P11]

- SEAT Ateca – vnější spodní páté dveře - HKau
- SEAT Ateca – vnitřní páté dveře - HKi
- ŠKODA Superb – blatník - KFL

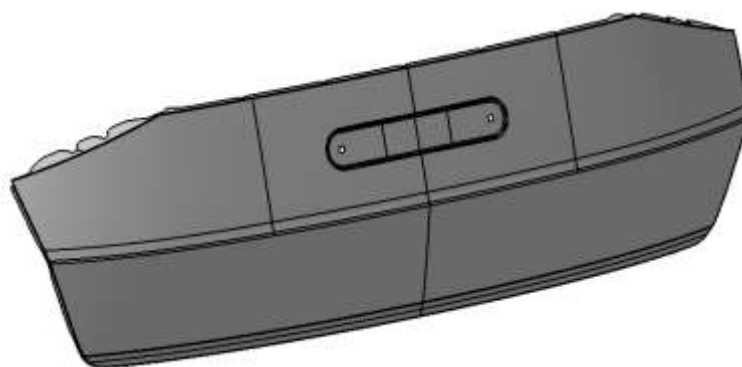
Na vybrané díly byla aplikována navržená metodika analýzy a kompenzace odpružení. V první fázi byl proveden návrh a nastavení lisovacího procesu. Pro vybrané díly bylo možné jen částečně využít dříve navržené numerické simulace lisovacího procesu. V době, kdy probíhal návrh lisovacího procesu vybraných dílů, byly využívány starší verze programu AutoForm, konkrétně verze R3.2. Od verze R5.2 přešel AutoForm na nové rozhraní s rozdílným řešením a přesností výpočtu fyzického modelu. Návrh a ověření navržené metodiky kompenzace odpružení bylo prováděno s využitím programu AutoForm verze R7.

Důležitou částí práce bylo zvolení vhodného postupu pro ověření navržené metodiky odpružení. Souhrn činností, které byly v rámci ověření navržené metodiky provedeny: [P7]

1. Analýza stávajícího metodického plánu – numerická simulace pro verzi AutoForm R3.2
2. Návrh a úprava metodického plánu – úprava numerická simulace pro verzi AutoForm R7 (zejména úprava tahového modelu, brzdících drážek, přídržovací síly a kinematiky lisovacích nástrojů)
3. Návrh a výpočet numerické simulace s využitím doporučených nastavení parametrů podle navržené metodiky pro nastavení numerické simulace (standarty a kontrolní list)
4. Analýza tvařitelnosti materiálu, jeho ztenčení, zvlnění, auditových, resp. pohledových závad a celkové velikosti odpružení
5. Porovnání rozměrové přesnosti výsledků numerické simulace se skutečností formou porovnání s TM dílem a se skenem či měrovým protokolem
6. Volba vhodné strategie pro kompenzaci odpružení, její provedení s následnou analýzou odpružení
7. Porovnání charakteru a velikosti odpružení po kompenzaci v jednotlivých iteračních smyčkách
8. Kontrola průběhu křivosti kompenzované geometrie lisovacích nástrojů, zejména z pohledu obrobitelnosti ploch a schopnosti nástroje s kompenzovanou geometrií zpracovat

9.2.1 Díl 1. kategorie – vnější spodní páté dveře SEAT Ateca

Díl spodních pátých vnějších dveří (HKau vozu SEAT Ateca), který patří do 1. kategorie výlisků dle složitosti geometrie a lisovacího procesu, je dílem s nejjednodušší geometrií. Model dílu, resp. TM díl (Teilmodel) díl navržený vývojem je zobrazen na obr. 9.4.

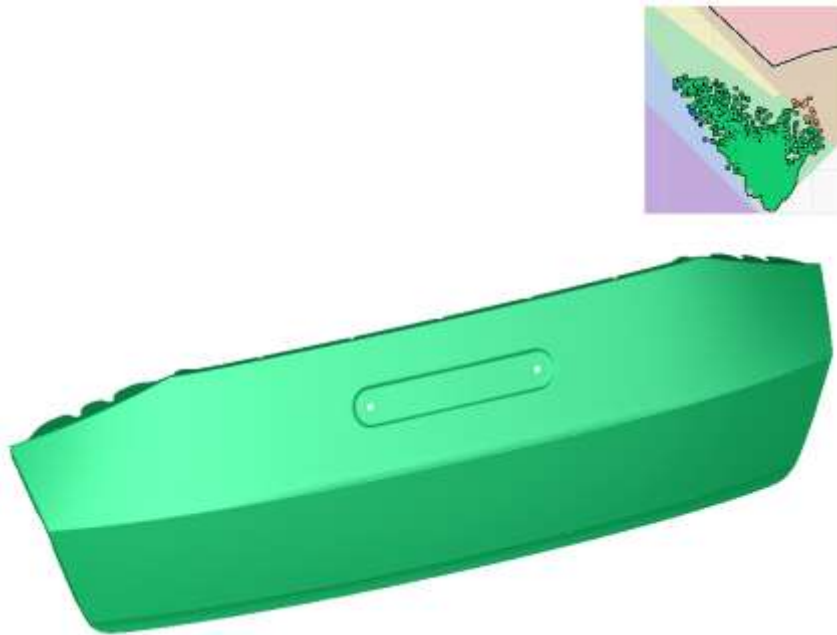


Obrázek 9.4 – Navržený model dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca (HKau).

Materiálem pro výrobu spodních pátých vnějších dveří je nízkouhlíková ocel DC06 válcovaná za studena o tloušťce materiálu 0,70 mm. Oproti vnitřním pátým dveřím (HKi), které jsou popsány v následující kapitole, je tento díl vyráběn klasickým jednočinným tažením. Základní nastavení numerické simulace lisovacího procesu popisuje tabulka 12. Z pohledu analýzy a následné kompenzace odpružení je velmi důležitá celková robustnost lisovacího procesu, zejména tvařitelnost (ztenčení materiálu od 3% do 25%). Tvařitelnost celého lisovacího procesu je zobrazena na obr. 9.5. [47]

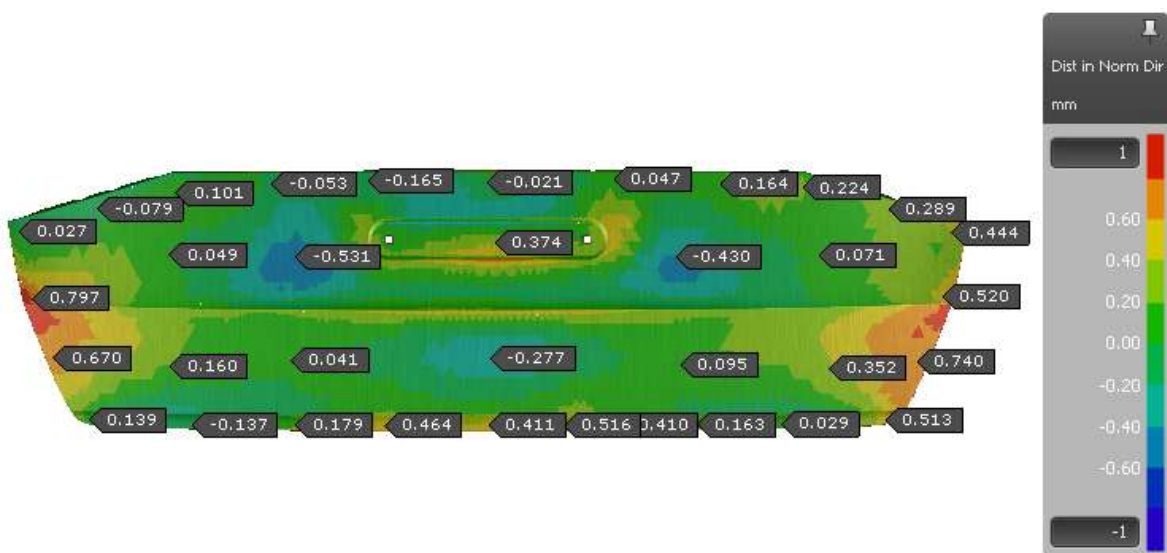
Tabulka 12 – Přehled nastavení numerické simulace lisovacího procesu pro díl HKau:

Základní nastavení numerické simulace pro díl HKau	
Materiál	DC06 (příloha č. 2)
Tloušťka materiálu	0,70 mm
Tažení	Jednočinné
Přidržovací síla	950 kN
Teoretická síla tažníku	2 300 kN
Zdvih (Hub)	100 mm
Koeficient tření	0,15



Obrázek 9.5 – Analýza tvařitelnosti lisovacího procesu spodních pátých vnějších dveří vozu SEAT Ateca (analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvařitelnost lisovacího procesu).

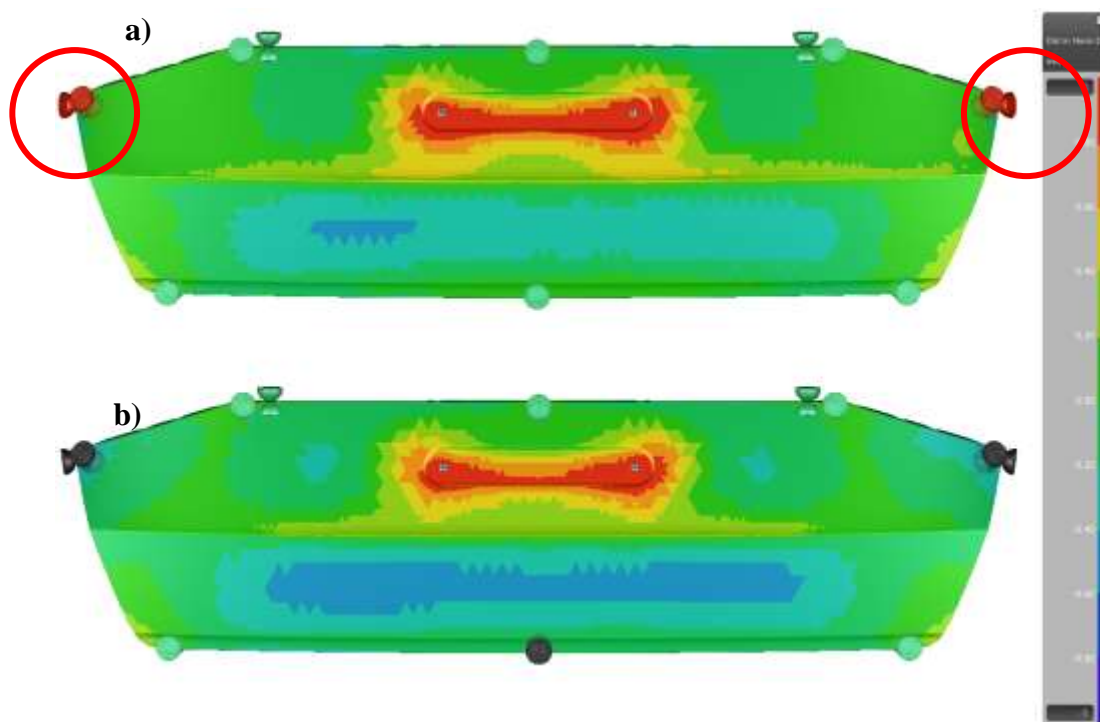
V rámci ověření navržené metodiky byla v první řadě věnována pozornost části metodiky, která se zaměřuje na přesnost analýzy odpružení. Pro ověření přesnosti analýzy odpružení u dílu vnějších spodních pátých dveří byl použit naskenovaný výlisek, který byl odebrán ze skutečného lisovacího procesu. Naskenovaný výlisek byl porovnán s virtuální analýzou odpružení provedenou v rámci numerické simulace. Výsledek porovnání je zobrazen na obr. 9.6. Ke skenování byl opět využit systém trojitého skenování ATOS od společnosti GOM.



Obrázek 9.6 – Ověření přesnosti virtuální analýzy odpružení na základě porovnání naskenovaného výlisku ze skutečného lisovacího procesu s analýzou odpružení v rámci numerické simulace (vnější spodní páté dveře SEAT Ateca). [P7]

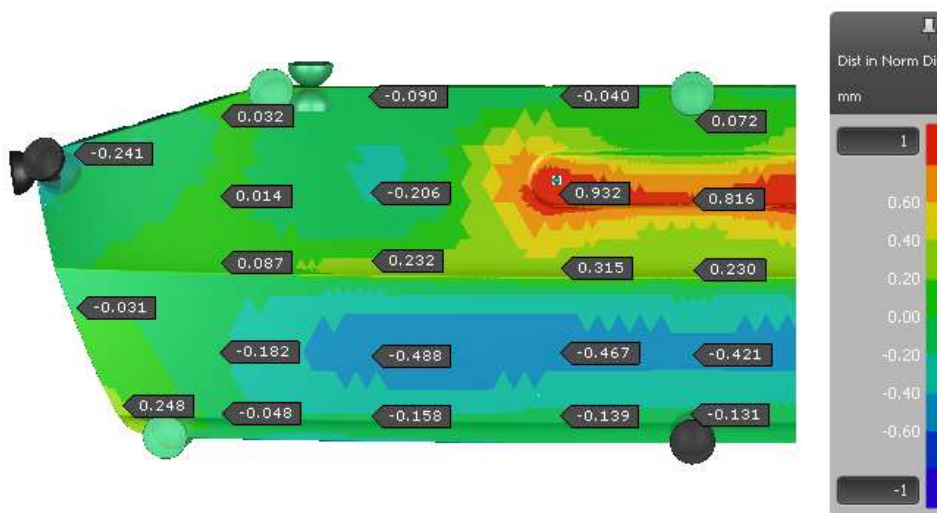
Výsledek porovnání reálného lisovacího procesu s analýzou odpružení v rámci numerické simulace lze klasifikovat jako velmi uspokojivý. Vyjma krajní části výlisku v blízké oblasti pohledové hrany (nepřesnost do 0,8 mm), se numerická simulace s realitou shodovala. Je potřeba si uvědomit, že během výpočtu numerické simulace dochází ke zjednodušení parametrů okrajových podmínek procesu (viz 2.6 Analýza okrajových podmínek). Navíc je nezbytné zmínit možnou nepřesnost způsobenou skutečným měřením, resp. v tomto případě skenováním výlisku. Tyto skutečnosti mohou velmi ovlivnit výslednou přesnost.

V rámci metodického plánu byla pro konkrétní díl navržena poloha 12 RPS bodů (určující pozice pro upnutí výlisku do upínek). Tak vysoký počet upínek za normálních podmínek znemožní dílu dostatečně se odpružit. Z toho důvodu byla metodika analýzy odpružení modifikována. Na obr. 9.7 je zobrazeno porovnání analýzy odpružení při upnutí do všech upínek, dle polohy RPS bodů dle metodickém plánu a nově navržené varianty.



Obrázek 9.7 – Porovnání analýzy odpružení mezi a) upnutím dílu ve všech pozicích podle zadaných RPS bodů a b) upraveným upnutím dílu s použitím méně upínek. [P7]

Při pohledu na obrázek 9.7, konkrétně na snímek a), je zřejmé, že výlisek má tendenci se výrazně deformovat ve středové oblasti. Na témže snímku si lze všimnout červenou barvou vyznačených upínek v rozích dílu. Ve vyznačených upínkách byla překročena maximální povolená hodnota normálové síly na upínku, 30 N. Na základě provedené analýzy pnutí tak byla provedena korekce upnutí výlisku. V upravené variantě (obrázek 9.7 b)) je využíváno se sedmi upínkami, okraje výlisku jsou ponechány rozvolněné.



Obrázek 9.8 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (díl spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca).

[P7]

Na upravené variantě upnutí výlisku byla provedena analýza odpružení, ta je zobrazena na obrázku 9.8. Hodnoty odpružení se v provedené analýze pohybovaly do maximální hodnoty cca 1 mm. Kritické hodnoty odpružení nad 0,8 mm bylo dosaženo pouze ve středové oblasti výlisku. Obecně se provádí kompenzace odpružení jednodušeji u dílů, kde má geometrická nepřesnost pravidelný průběh. Na analýze odpružení na obrázku 9.8 lze sledovat nespojitý průběh odpružení. Vrchní část dílu v oblasti prolisu pro registrační značku má tendenci se odpružit do kladných hodnot (ve smyslu k absolutnímu souřadnicovému systému, tedy směrem ven z vozu). Naopak ve spodní části (hned pod pohledovou linií) má díl tendenci se odpružit do záporných hodnot.

Při řešení problematiky volby strategie kompenzace odpružení byla vzhledem k velkému počtu provedených simulací snaha rychle a jednoduše vyhodnotit vhodnost dané strategie. Prvním hodnotícím kritériem bylo vizuální porovnání analýzy odpružení, podobně jako je tomu na obrázku 9.8. V některých případech nešlo jednoznačně vizuálně vyhodnotit danou strategii. Z toho důvodu byly jednotlivé iterace dané strategie hodnoceny pomocí navrženého **koeficientu velikosti odpružení** (rovnice 39).

$$S_i = \frac{|a| + |b| + |c| + \dots + |n|}{n_{bod}} \quad (39)$$

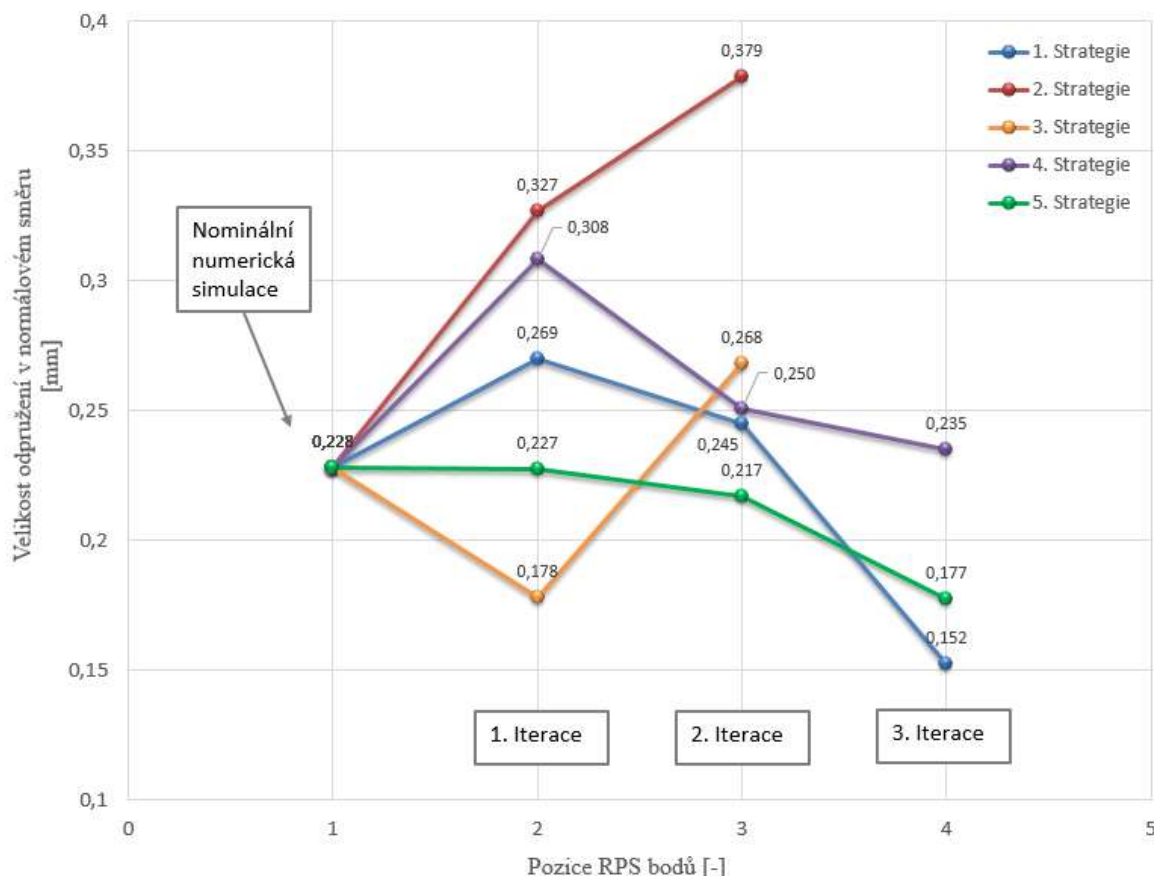
Kde:

S_i ... Koeficient velikosti odpružení konkrétní iterace

a, b, c, ..., n ... velikost odpružení v daném měřicím místě

n_{bod} ... počet měřicích bodů

Zjištěné hodnoty koeficientů odpružení jednotlivých strategií a iterací byly shrnuty do grafu, který je zobrazen na obrázku 9.9. V grafu je zobrazena jen část provedených strategií. V některých případech zvolené strategie kompenzace odpružení bylo hned zpočátku zřejmé, že daná strategie nevede ke zlepšení celkové přesnosti. [P11]



Obrázek 9.9 – Porovnání výsledků provedených strategií kompenzace odpružení dílu HKau SEAT Ateca. [P7]

Obr. 9.9 vystihuje, že pouze dvě ze zvolených strategií kompenzace odpružení pro vybraný díl vedly ke zlepšení celkové korekci. Jedná se o **strategii č. 5**, ve které byla geometrie nástrojů kompenzována jen v poslední kalibrovací operaci OP50. Tato strategie jako jediná vykazovala ustálený klesající trend, v závěru ale nedosáhla nejmenších hodnot odpružení. Dále se jedná se o **strategii č. 1**, ve které byla geometrie nástrojů kompenzována v každé operaci (OP20, 30, 40 a 50). Při této strategii bylo dosaženo výrazného snížení velikosti odpružení. Zmíněná strategie byla vyhodnocena jako nejpříznivější a je graficky zobrazena na obr. 9.10. Podrobné parametry této strategie jsou popsány v tabulce 13.



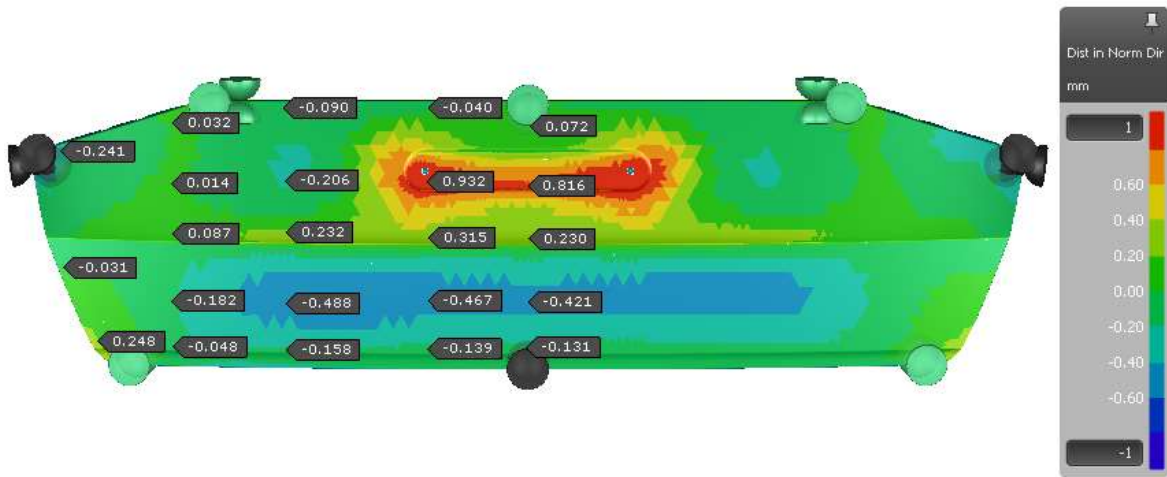
Obrázek 9.10 – Grafické zobrazení finální kompenzační strategie s třemi iteračními smyčkami.

[P7]

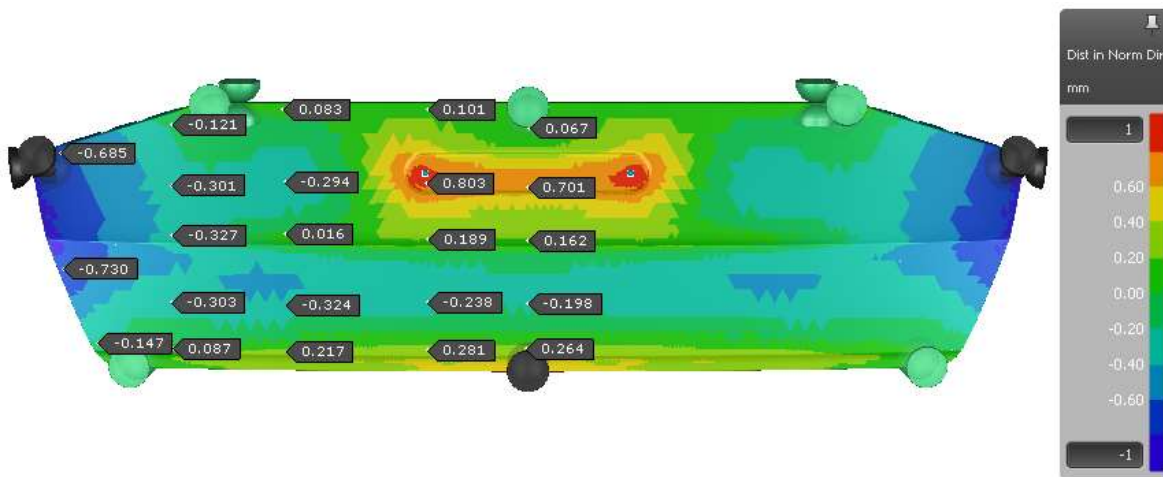
Tabulka 13 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu: [P7]

Kompenzace odpružení dílu HKau	
Kompenzace na základě analýzy v operaci	OP95 (konečná analýza odpružení)
Kompenzované operace	Geometrie nástrojů kompenzována ve všech operacích s nastavenou závislostí
Počet RPS bodů při analýze odpružení	7
Kompenzační faktor	1
Faktor vyhlazení	0,25
Počet iterací	3
Povolená geometrická nepřesnost	0,8 / 0,2 mm

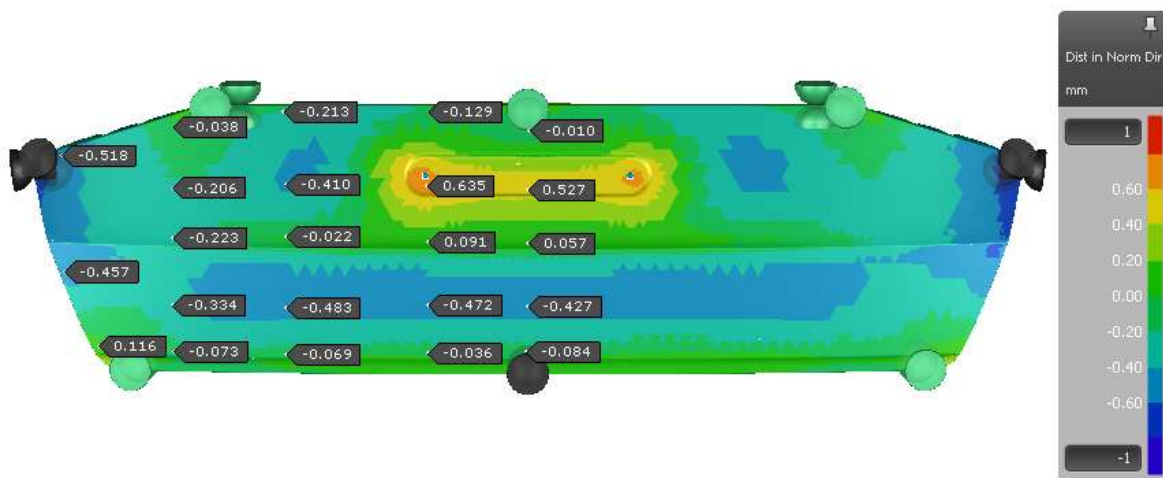
Na následujících snímcích (obr. 9.11 – 9.14) je zobrazen vývoj odpružení po jednotlivých kompenzačních iteracích zvolené **strategie č. 1**. Ihned během první iterace dochází u odpružení k výraznému zhoršení výsledné přesnosti (viz průběh strategie č. 1 na obrázku 9.9). Ke zhoršení velikosti odpružení dochází zejména v krajní oblasti výlisku. Obecně jen v málo případech dochází k výraznému zlepšení odpružení po první iteraci kompenzace. Ke zlepšení po první iteraci došlo např. u strategie č. 3 (kompenzována pouze geometrie v tahové operaci OP20), avšak hned následná iterace přinesla skokové zhoršení přesnosti.



Obrázek 9.11 – Analýza odpružení na základě vstupní numerické simulace do kompenzace odpružení. [P7]

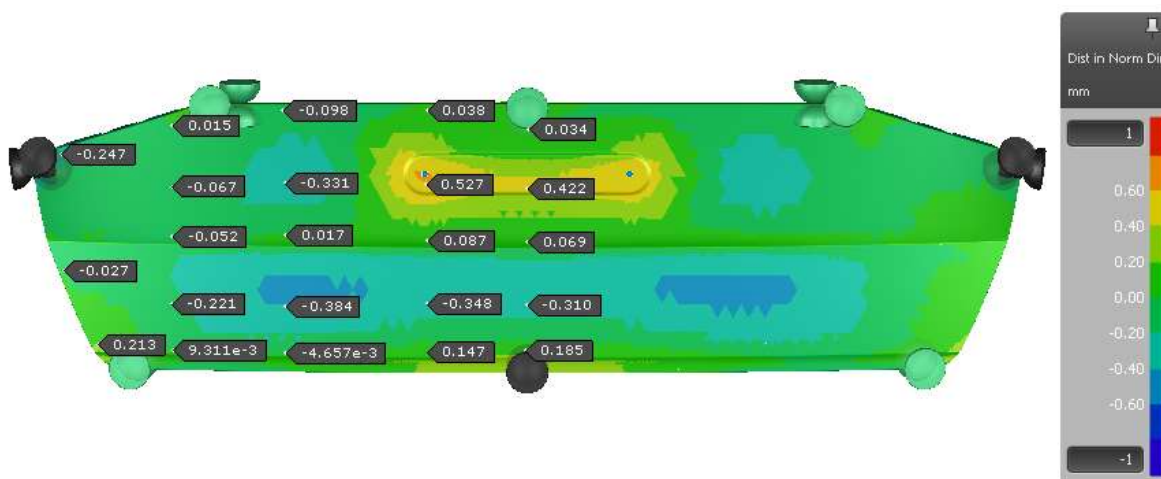


Obrázek 9.12 – Analýza odpružení po první iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7]



Obrázek 9.13 – Analýza odpružení po druhé iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7]

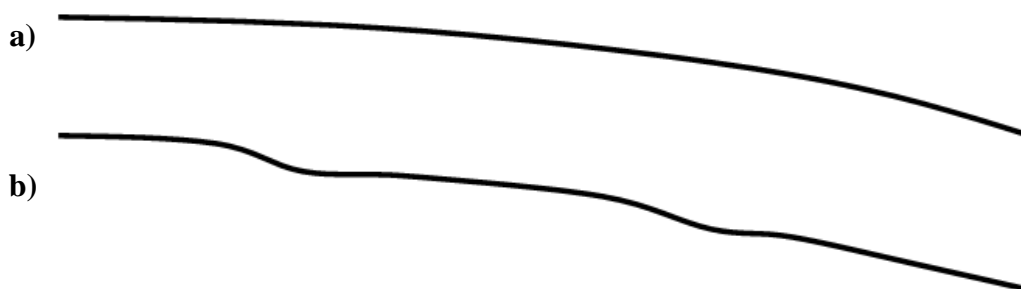
V iteraci číslo 2 (obr. 9.12) a 3 (obr. 9.13) bylo dosaženo viditelného zlepšení oproti první iteraci. Nejlepších výsledků bylo dosaženo až po třetí iteraci (obr. 9.14), ve které byla naměřena nejmenší velikost odpružení ze všech provedených strategií. Největší hodnoty odpružení, i po kompenzaci, byly naměřeny ve středové oblasti dílu (cca 0,6 mm) a v krajní části dílu (cca 0,6 mm). Analýza odpružení strategie č. 1 tak po třetí iteraci **splňuje** dané kritérium pro dodržení přesnosti dílu (0,8/0,2 mm).



Obrázek 9.14 – Analýza odpružení po třetí iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7]

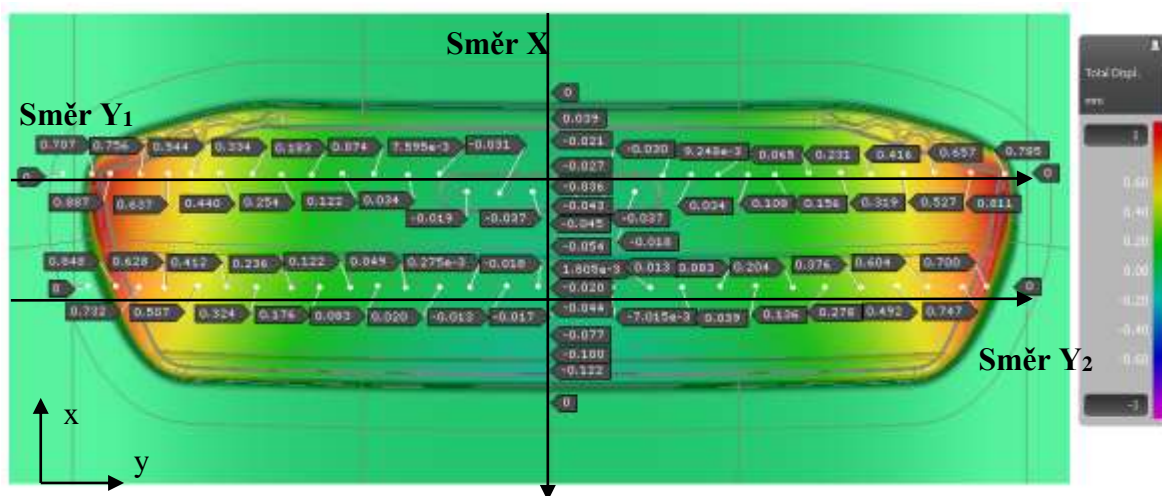
V tabulce 13, která popisuje základní parametry aplikované kompenzační strategie, je zmíněn faktor vyhlazení. Tento faktor je velmi důležitý z pohledu následného obrábění lisovacího náradí. Při návrhu funkčních ploch lisovacího náradí by měla být dodržena pravidla pravidelné a spojitě návaznosti ploch. V oblastech nástroje, které slouží k lisování šedých zón dílu, by na sebe měly plochy navazovat minimálně **tangentním** napojením (napojení, kdy jsou směry tangent shodné). V případě ploch na nástroji, které slouží k lisování pohledových zón, musí být dodrženo napojení ploch „**křivostní**“ (směry tangent ploch jsou shodné a poloměr křivosti se mění spojitě). V případě nedodržení tohoto pravidla hrozí vylisování dílu s nespojitými přechody ploch, které mají za následek ostře se lámající světlo na plochách po nalakování dílu. Ke konečnému vyhlazení a korekci ploch je možné využít speciální program, např. ICEM-Surf. Dalším důvodem, proč je nutné dodržet spojitý průběh ploch, je následné zapracování náradí ve výrobě. Čím je geometrie nástroje tvarově složitější (viz porovnání ploch na obr. 9.15), tím je zapracování náradí obtížnější. [P11]

Čím je hodnota faktoru vyhlazení v rámci kompenzace odpružení nižší, tím je původní geometrie méně narušená. Čím je hodnota faktoru vyšší, tím jsou přechody jednotlivých kompenzovaných ploch více skokové a činná geometrie nástroje není spojitá. Ovšem s vyšším faktorem vyhlazení je možné více ovlivnit jednotlivé oblasti odpružení. Na základě provedených experimentů byla jako optimální hodnota faktoru vyhlazení stanovena v rozmezí **0,2 – 0,4**. V tomto rozmezí hodnot bylo docíleno nejlepších výsledků, kdy je kompenzovanou geometrie lisovacího nářadí stále možné vyrobit.

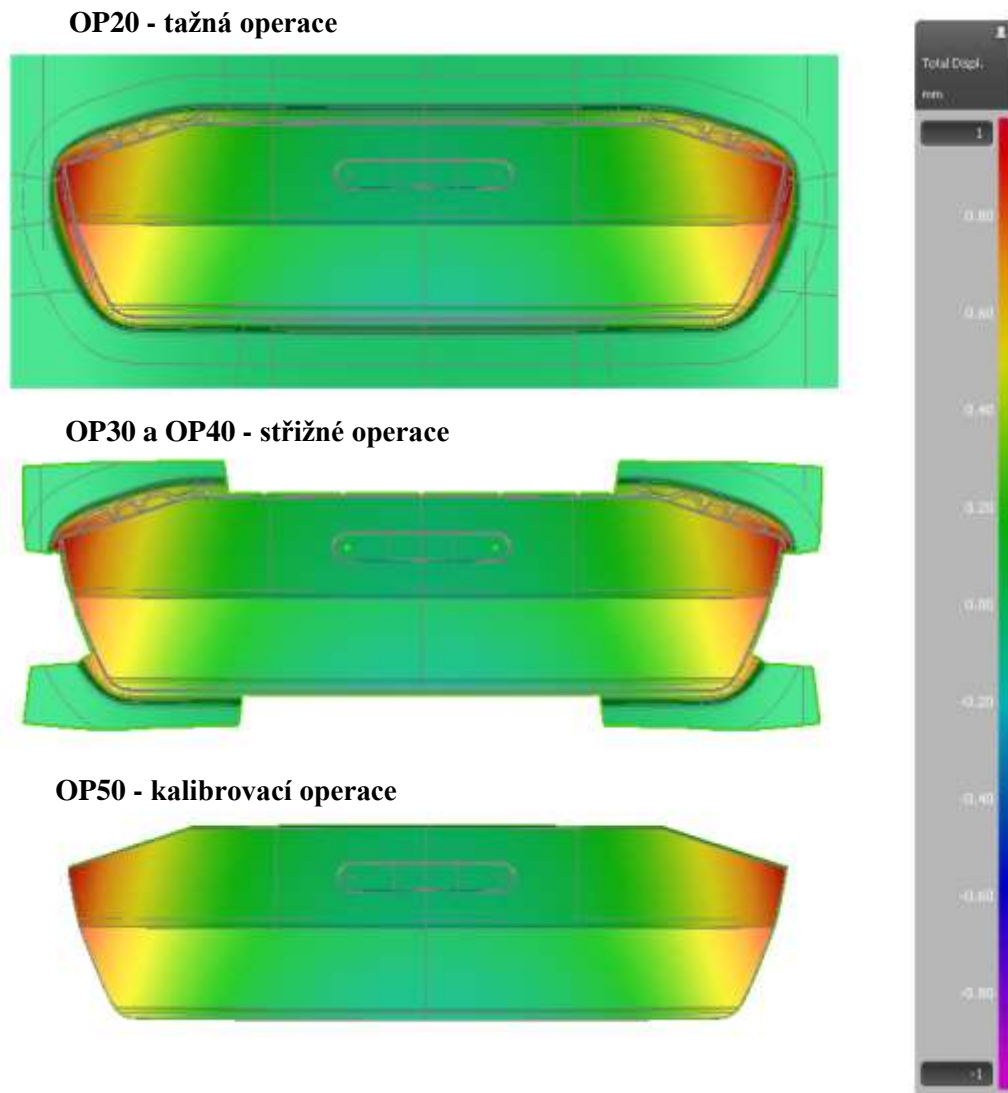


Obrázek 9.15 – Porovnání spojitého a nespojitého průběhu ploch nástroje v řezu, a) navržená geometrie nástroje, b) rozbitá - kompenzovaná geometrie nástroje (možné kontrolovat faktorem vyhlazení). [P8]

V rámci této konkrétní kompenzační strategie byl aplikován **faktor vyhlazení 0,25**. Takto nízká hodnota měla za výsledek pravidelné přechody kompenzovaných ploch. K největší kompenzaci geometrie, resp. odchylky od původní geometrie, bylo dosaženo v krajní oblasti dílu. Přesné hodnoty kompenzované geometrie jsou zobrazeny na obr. 9.16. Zároveň byla v následných operacích nastavena závislost geometrie na kompenzované geometrii v operaci OP20. Výsledkem je jednotná kompenzace geometrie pro všechny lisovací operace. Kompenzovaná geometrie je zobrazena na obr. 9.17.

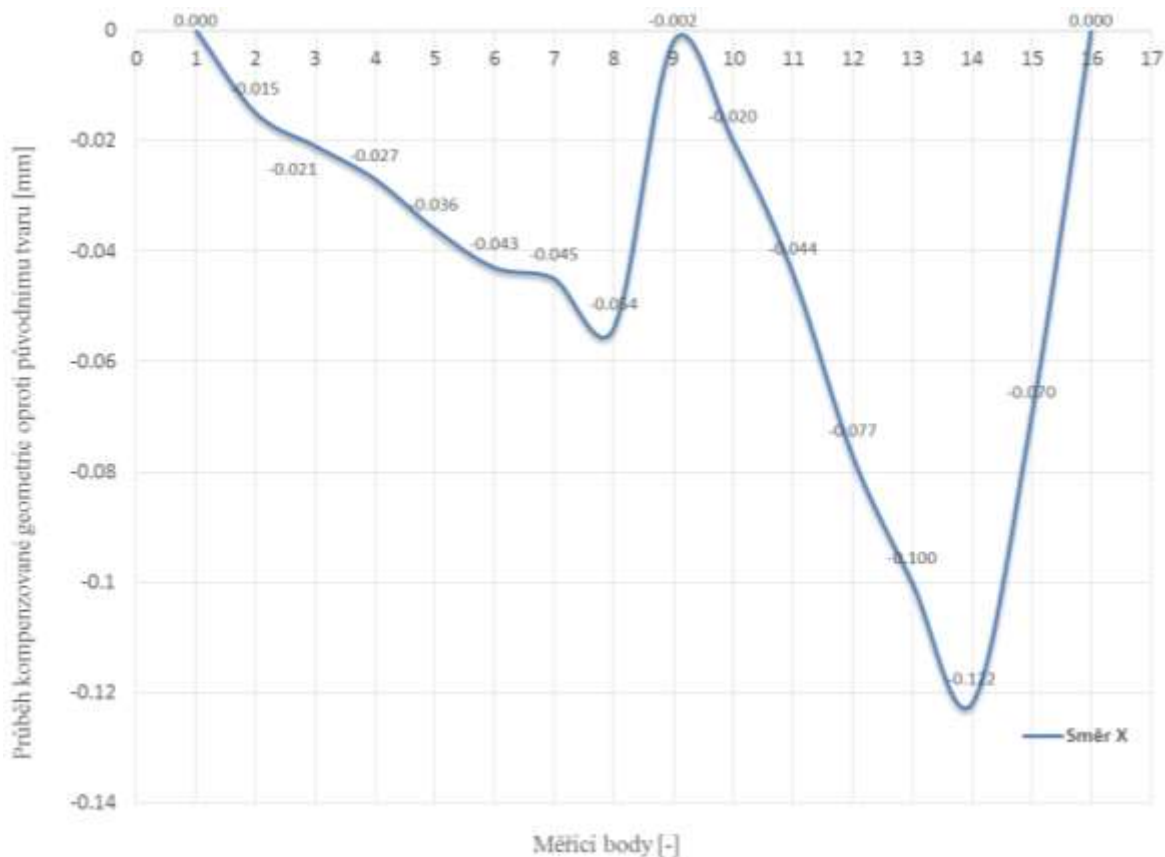


Obrázek 9.16 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]



Obrázek 9.17 – Grafické porovnání původní geometrie lisovacích nástrojů v jednotlivých operacích a výsledné změny kompenzované geometrie nástrojů. [P7]

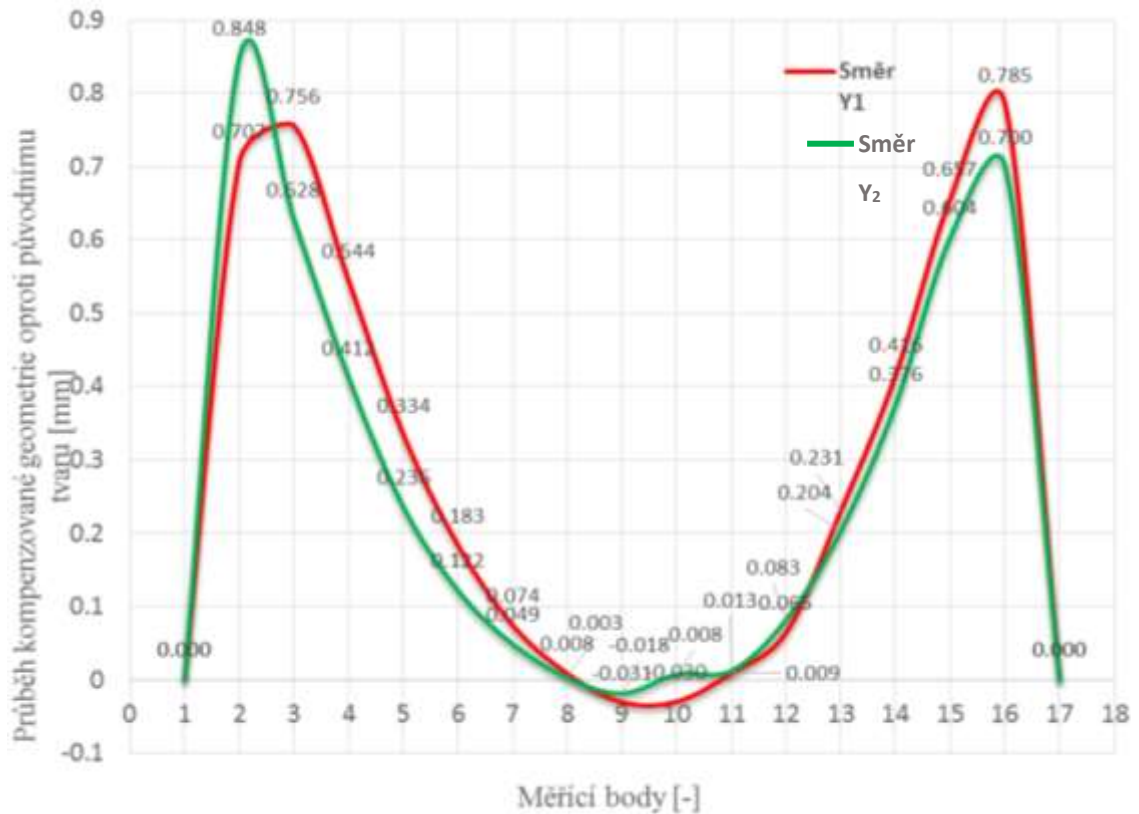
Z důvodu přehlednějšího vyhodnocení byl průběh velikosti kompenzované geometrie rozdělen do dvou samostatných grafů podle směru měření. Průběh geometrie ve **směru X** je zobrazen na obr. 9.18. Při pohledu na průběh ve směru X je zřejmé, že ve středové části byla geometrie kompenzována nezávisle ve dvou oblastech. V obou oblastech byla geometrie kompenzována do záporného směru, tedy směrem do vozu. Největší odchylky kompenzované geometrie od původního nástroje bylo dosaženo ve spodní oblasti, kde byla geometrie kompenzována o 0,122 mm. Jedná se tedy jen o velmi malé hodnoty změny oproti původní ploše geometrie nástroje.



Obrázek 9.18 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci ve směru osy X). [P7]

Průběh velikosti kompenzované geometrie ve směru os Y_1 a Y_2 je zobrazen na obr. 9.19. V tomto směru byly vyhodnocovány dva průběhy. V obou případech bylo v rámci kompenzace dosaženo velmi dobrých a spojitých průběhů, bez skokových přechodů v geometrii. V krajních oblastech byla geometrie kompenzována v pozitivním směru, tedy směrem ven z vozu. V krajních oblastech nástroje bylo dosaženo odchylky až 0,85 mm oproti původní geometrii nástroje. V této oblasti byla geometrie po odpružení kompenzována o velikost cca 0,5 mm. Naopak ve středové oblasti nástroje docházelo jen k velmi malým změnám.

Lze si všimnout, že kompenzace geometrie nástroje není přímo úměrná velikosti odpružení. **Při ruční úpravě ploch** (stávající přístup s metodou bombírování) **se využívá přístupu k problematice odpružení jako u jednoduchého ohybu**. Tedy s přímou úměrou, kdy je geometrie kompenzována o hodnotu velikost odpružení. Tento současný přístup při kompenzaci odpružení dosahuje jen málokdy přesných výsledků. [P7]



Obrázek 9.19 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci ve směru Y_1 a Y_2). [P7]

I přes jednoduchou geometrii dílu spodních pátých dveří nebyla aplikace navržené metodiky zpočátku optimální. Po uspokojivém ověření přesnosti numerické simulace (porovnání s naskenovaným výliskem) bylo potřeba se zabývat vhodným upnutím výlisku do měřicího přípravku. Byla provedena korekce počtu upínek při měření z 12 na 7 upínek. Důvodem byla potřeba díl více uvolnit, jelikož při analýze odpružení za plného počtu upínek vyvíjel výlisk tlak do krajních upínek. Až následně bylo možné přistoupit k volbě vhodné strategie kompenzace odpružení. V průběhu volby ideální strategie kompenzace odpružení bylo při některých strategiích docíleno velmi špatných výsledků, kdy ihned po první či druhé iteraci docházelo ke zhoršení odpružení. Ze zvolených strategií pouze dvě (strategie č. 1 a 5) vykazovaly výrazné zlepšení odpružení. Finální zvolená strategie č. 1 měla za výsledek zlepšení odpružení na maximální hodnoty 0,6 mm, které vyhovují danému kritériu (0,8 mm). Díky nízkému faktoru vyhlazení (hodnota 0,25) bylo docíleno pravidelného průběhu křivosti ploch a tudíž by bylo možné takto kompenzovanou geometrii nástrojů vyrobit. [P7], [P11]

9.2.2 Díl 2. kategorie – vnitřní páté dveře SEAT Ateca

Pro ověření navržené metodiky odpružení byl v rámci druhé kategorie výlisků zvolen díl vnitřních pátých dveří (HKi) vozu SEAT Ateca (obr. 9.20). Lisovací proces vnitřních dílů je oproti dílům vnějším doprovázen velkým počtem střížných a děrovacích technologií. Příkladem jsou zvolené vnitřní páté dveře, kde je konkrétně v lisovací operaci OP50 děrováno 75 otvorů, které jsou rozmístěny nerovnoměrně po celé ploše výlisku. Střížné a děrovací technologie výrazně ovlivňují rozměrovou přesnost výlisků a to vzhledem ke vnášení dodatečného vnitřního pnutí do materiálu. Lisovací proces dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca je popsán v kapitole 5. *Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely.*

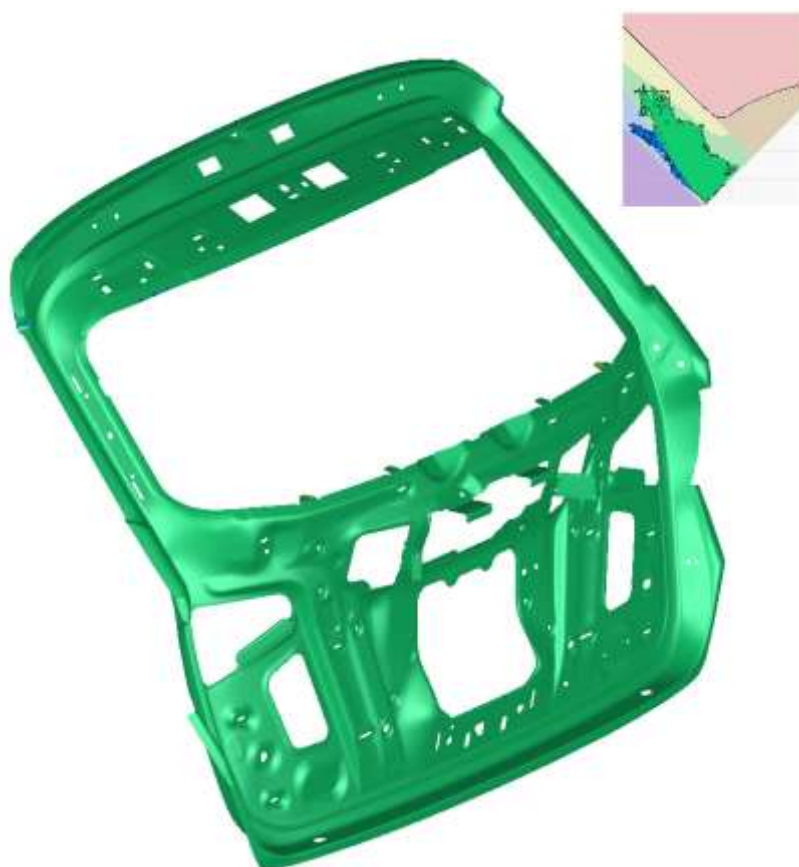


Obrázek 9.20 – Geometrie TM dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca.

Díl je vyráběn z nízkouhlíkové oceli DX57D (materiálový list viz příloha č. 3) o tloušťce materiálu 0,70 mm (viz tabulka 14, která popisuje základní nastavení numerické simulace). Oproti ostatním vybraným dílům je výrobní proces tohoto dílu navíc složitější z toho důvodu, že operace tažení probíhá dvojčinně (více v kapitole 5. *Volba vhodných dílů částí karoserie pro experimentální účely*). Celková robustnost lisovacího procesu výlisku je zobrazena ve formě analýzy tvařitelnosti materiálu na obr. 9.21. [P7]

Tabulka 14 – Přehled nastavení lisovacího procesu pro díl HKi:

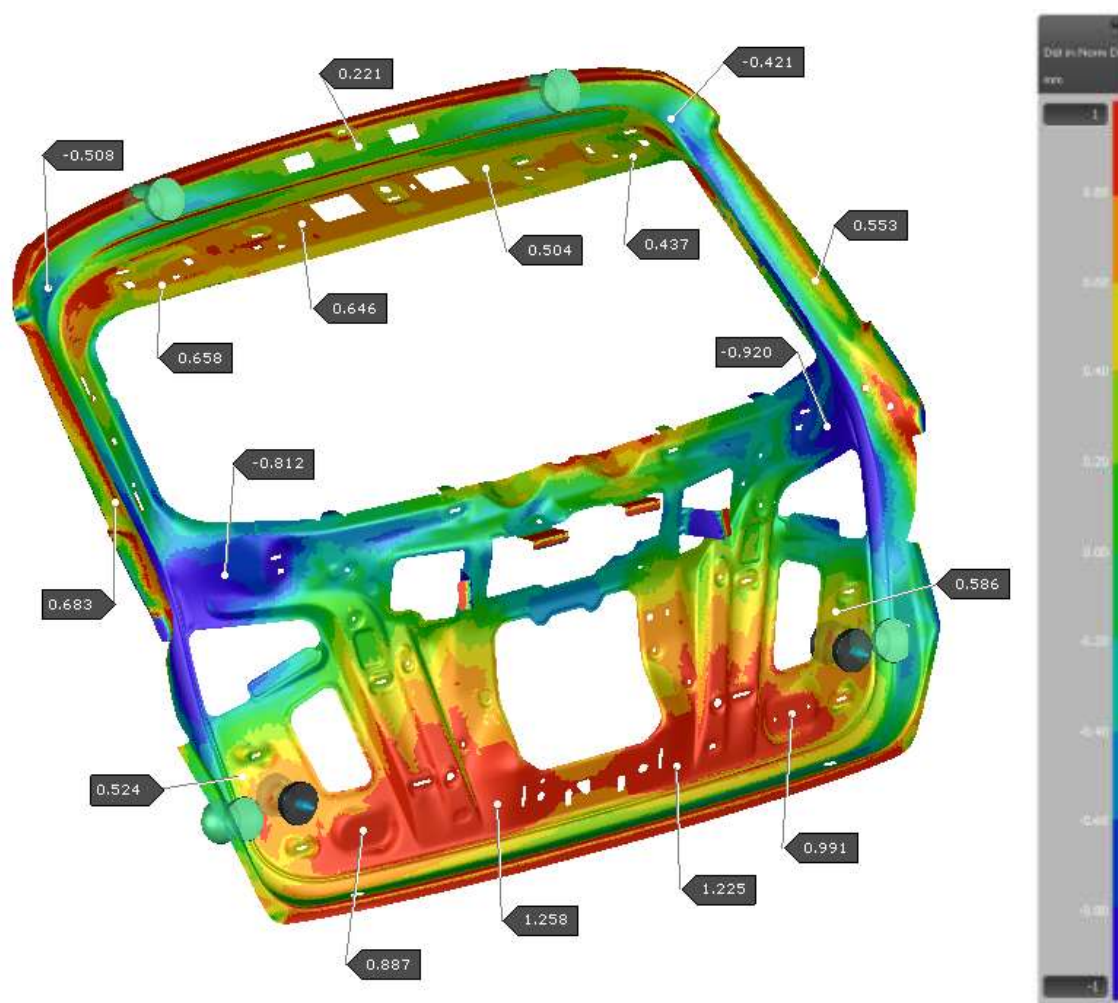
Základní nastavení numerické simulace pro díl HKi	
Materiál	DX57D (příloha č. 3)
Tloušťka materiálu	0,70 mm
Tažení	Dvojčinné
Přidržovací síla	1 000 kN
Teoretická síla tažníku	4 500 kN
Zdvih (Hub)	135 mm
Koeficient tření	0,15



Obrázek 9.21 – Analýza tvaritelnosti lisovacího procesu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca (analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvaritelnost lisovacího procesu).

Analýza odpružení materiálu byla provedena podle navržené metodiky, která je popsána v kapitole 7.3 *Návrh metodiky analýzy odpružení*. Pro popsanou analýzu odpružení byla použita poloha RPS bodů na základě aktuálních dat (stav dat pro metodické plánování bez nutnosti upravovat upnutí výlisku). Při pohledu na velikost odpružení ve vstupní numerické simulaci (viz obr. 9.22) se i přes komplexní lisovací proces jedná o relativně dobré výsledky.

Maximální odpružení materiálu dosahuje hodnoty 1,3 mm, avšak ve většině oblastech výlisku se velikost odpružení pohybuje spíše do hodnoty 1 mm.

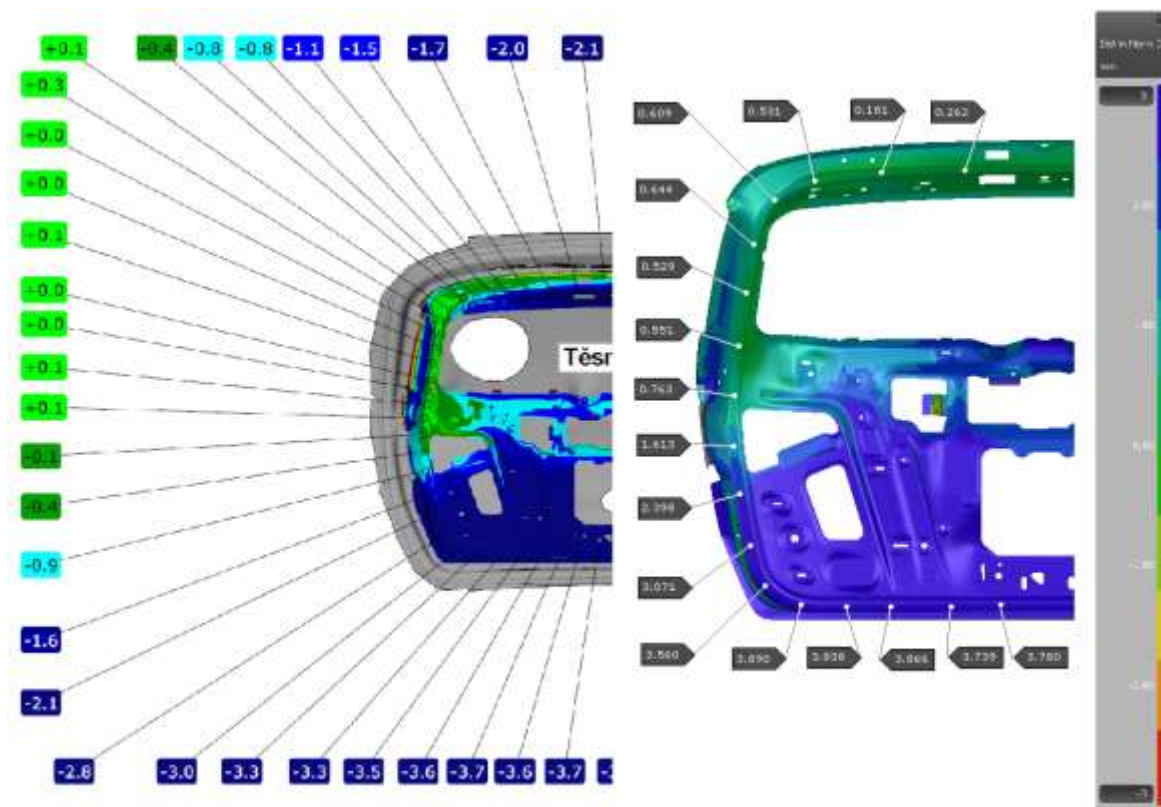


Obrázek 9.22 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (díl vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca).

[P11]

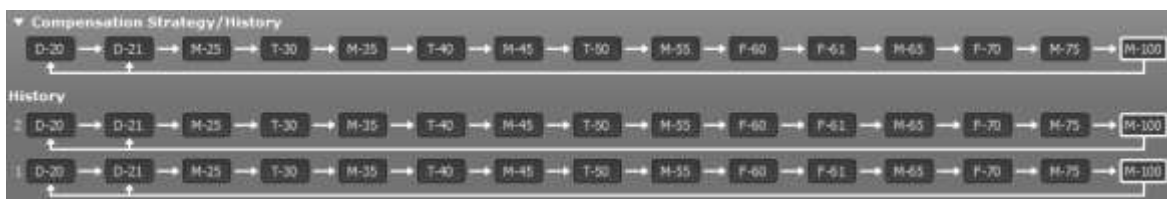
Výlisek ze skutečného lisovacího procesu byl naskenován a digitálně převeden, aby bylo možné provést porovnání s numerickou simulací. Následně byla provedena analýza odpružení za stejných podmínek jako při skutečném měření. Porovnání výsledků analýzy odpružení zjištěných skenováním skutečného dílu a virtuální analýzy jsou zobrazeny na obr. 9.23. Pro porovnání numerické simulace a reálného měření byla primárně měřena oblast dosedací plochy vnitřních pátých dveří, kde jsou nároky na dosažení přesných tvarových rozměrů velmi vysoké. Mimo vrchní oblast dílu (rozdíl velikostí odpružení v maximální míře do hodnoty 1 mm) dosahovala analýza odpružení numerické simulace velmi podobných výsledků s reálným lisovacím procesem.

Spodní část pátých dveří je prakticky totožná v obou analyzovaných případech (rozdíl velikosti odpružení v maximální míře do hodnoty 0,5 mm). I přes to, že při porovnání numerické simulace s reálným měřením nebylo dosaženo absolutně shodných výsledků, lze brát výsledky porovnání jako dostatečně přesné a bylo možné přistoupit ke kompenzaci odpružení.



Obrázek 9.23 – Porovnání analýzy odpružení mezi naskenovaným dílem ze skutečného lisovacího procesu (a) a numerickou simulací (b). [P11]

Ke kompenzaci odpružení byl opět využit speciální výpočtový modul AutoForm Compensator. Jako optimální strategie kompenzace odpružení se i přes větší složitost dílu uplatnila kompenzace geometrie lisovacích nástrojů pouze v tažné operaci OP20 (grafické zobrazení strategie viz obr. 9.24). Kompenzace odpružení v následných střížných a kalibrovacích operacích je u podobných dílů více komplikovaná. Důvodem je větší četnost střížných otvorů a potřeba kalibrací v následných operacích.

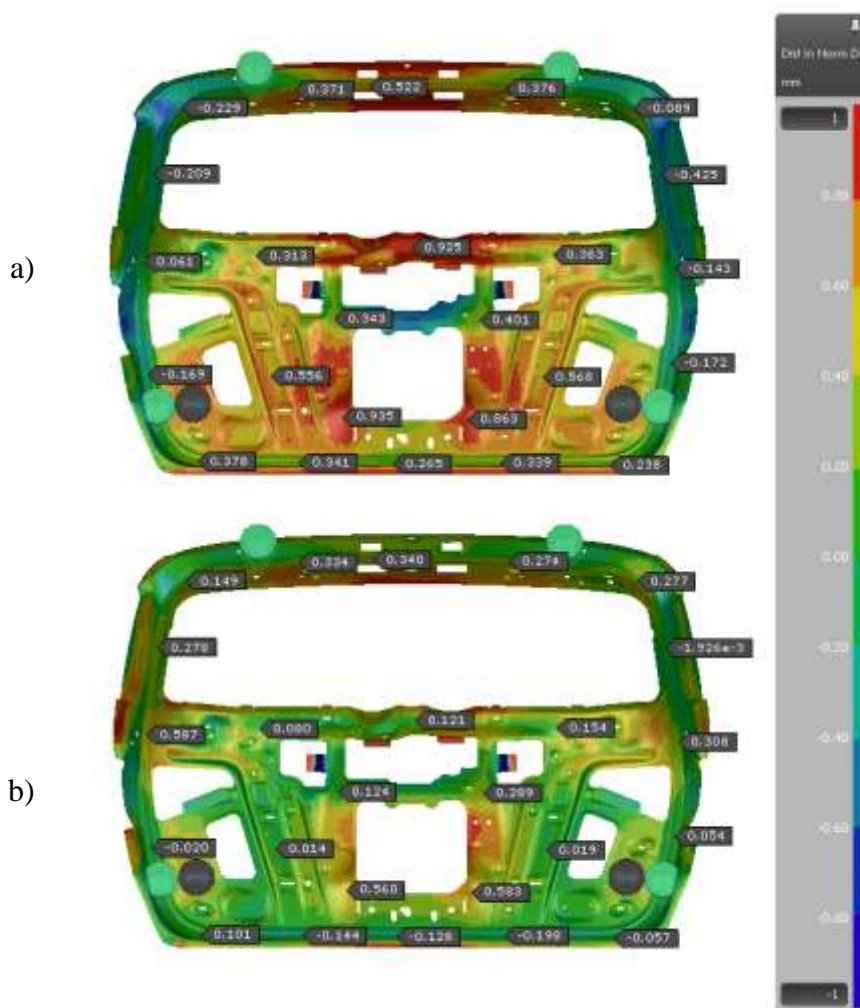


Obrázek 9.24 – Grafické zobrazení finální aplikované kompenzační strategie.

Tabulka 15 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu:

Kompenzace odpružení dílu HKi	
Kompenzace na základě analýzy v operaci	OP95 (konečná analýza odpružení)
Kompenzované operace	OP20 (tažná operace)
Počet RPS bodů při analýze odpružení	4
Kompenzační faktor	1
Faktor vyhlazení	0,3
Počet iterací	3
Povolená geometrická nepřesnost	0,8 / 0,2 mm

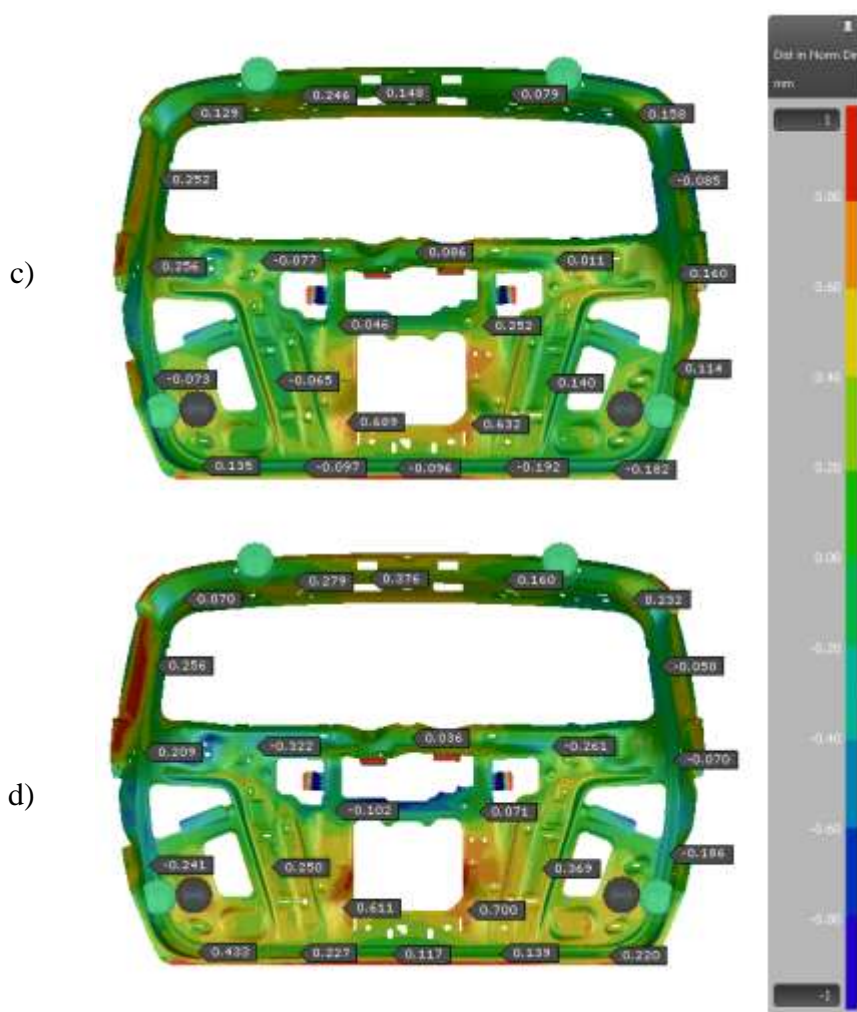
Průběh velikosti odpružení je po jednotlivých iteracích zobrazen na obr. 9.25 a 9.26. Obr. 9.25 a) zobrazuje původní analýzu odpružení, kdy byl výlisek upnut do měřicích bodů.



Obrázek 9.25 – Analýza odpružení v jednotlivých iteracích kompenzace, a) analýza odpružení vstupní nekompenzované numerické simulace, b) analýza odpružení po první iteraci kompenzace.

[P11]

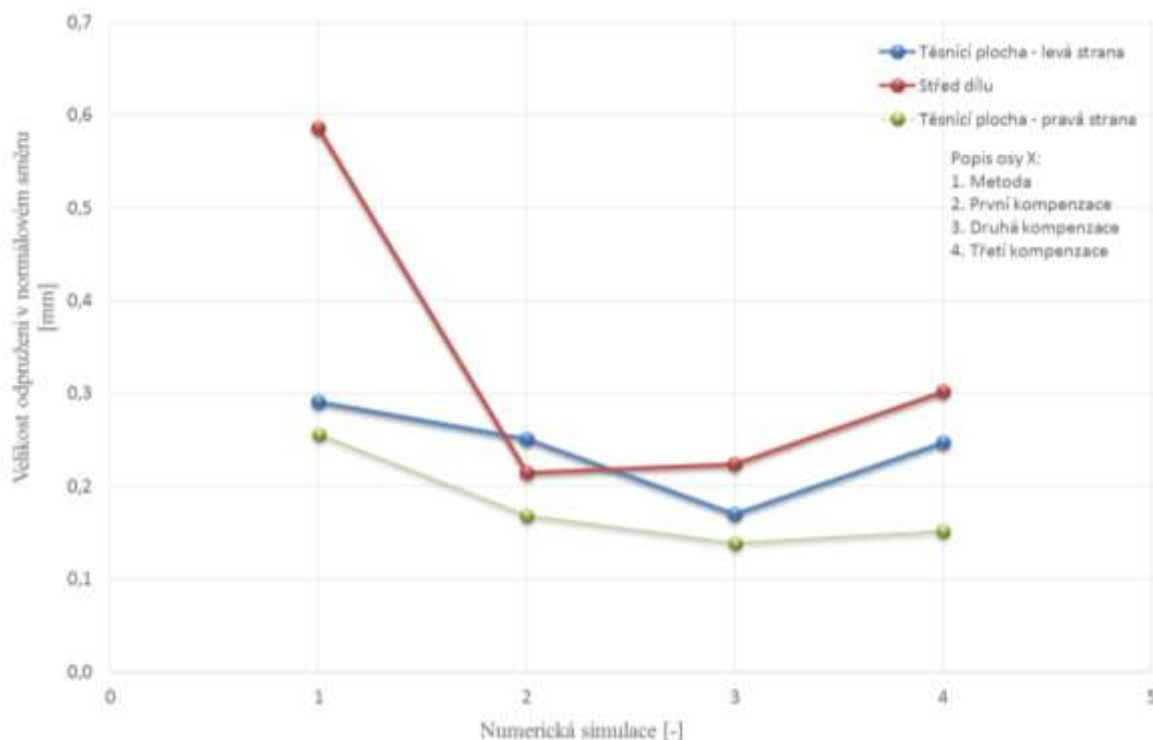
Velikost odpružení v původní analýze je v porovnání s ostatními zkoušenými díly relativně příznivá. Limitní hodnota pro odchylku od geometrie dílu (0,8 mm) je překročena jen ve středové oblasti výlisku. Po provedení první iterace kompenzace odpružení (viz obr. 9.25 b)) bylo dosaženo viditelného zlepšení přesnosti. Největšího zlepšení přesnosti bylo docíleno ve zmíněné středové oblasti dílu (v měřené oblasti z hodnoty odpružení 0,9 mm na cca 0,5 mm). Následující dvě iterace jsou zobrazeny na obr. 9.26 a) a b).



Obrázek 9.26 – Analýza odpružení v následných iteracích kompenzace odpružení (c) druhá iterace kompenzace, d) třetí iterace kompenzace). [P11]

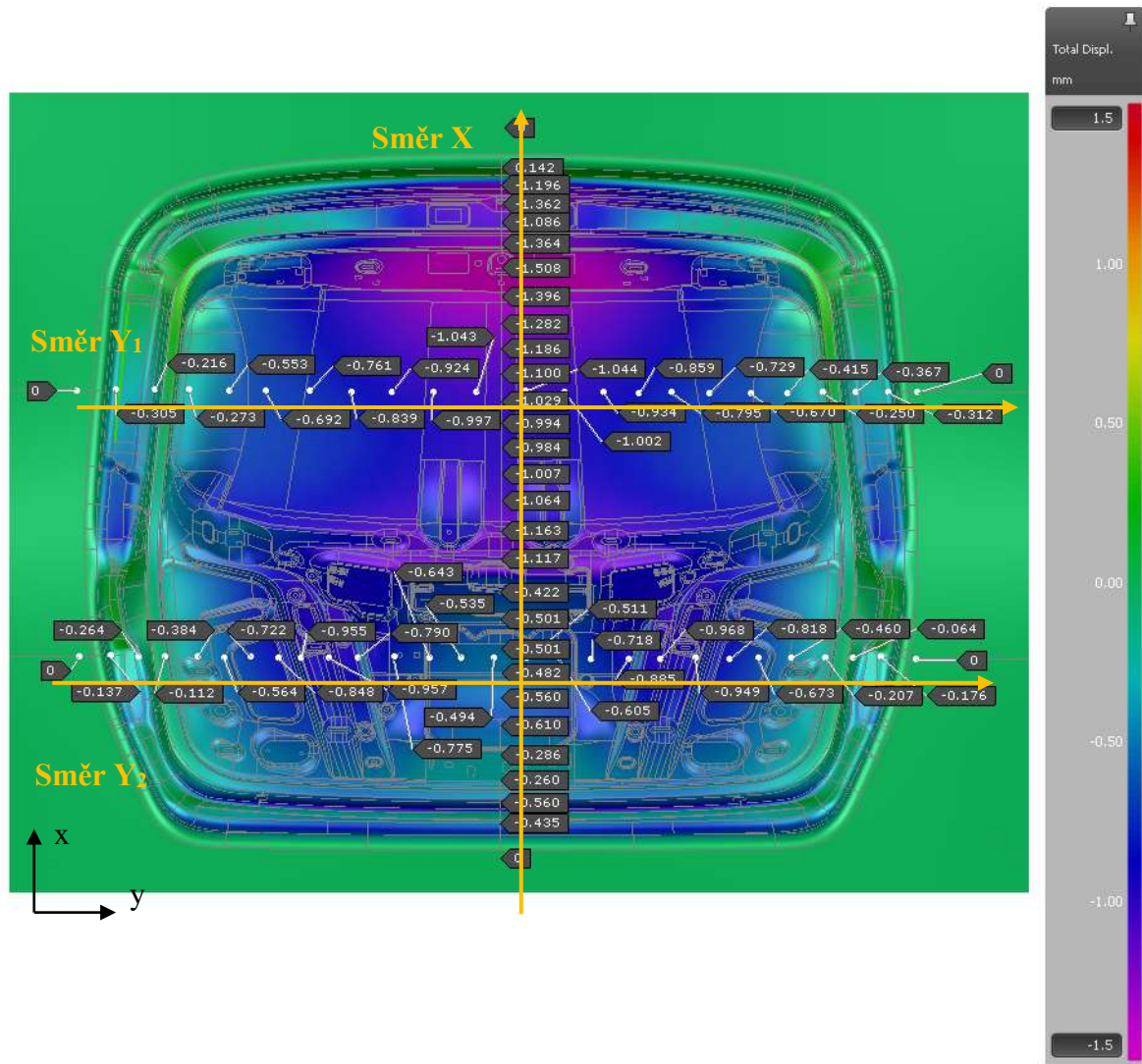
Optimálních výsledků kompenzace odpružení bylo dosaženo ve druhé iteraci kompenzace. Po provedení třetí iterace kompenzace odpružení se přesnost opět začala zhoršovat. Podobný trend bylo možné sledovat u volby vhodné strategie kompenzace odpružení pro předchozí díl (kapitola 9.2.1 *Díl 1. kategorie – vnější spodní páté dveře SEAT Ateca*). Pro vhodnější porovnání průběhu velikosti odpružení byl opět zvolen koeficient odpružení S_i (rovnice 39). Analýza velikosti odpružení byla rozdělena do třech oblastí, jelikož každá oblast měla při kompenzaci odpružení samostatný trend.

Oblasti byly rozděleny na **levou** a **pravou** část těsnicí plochy a na **středovou** část dílu. Ze zjištěných hodnot odpružení byla následně sestavena závislost jednotlivých iterací v konkrétní oblasti (obr. 9.27).



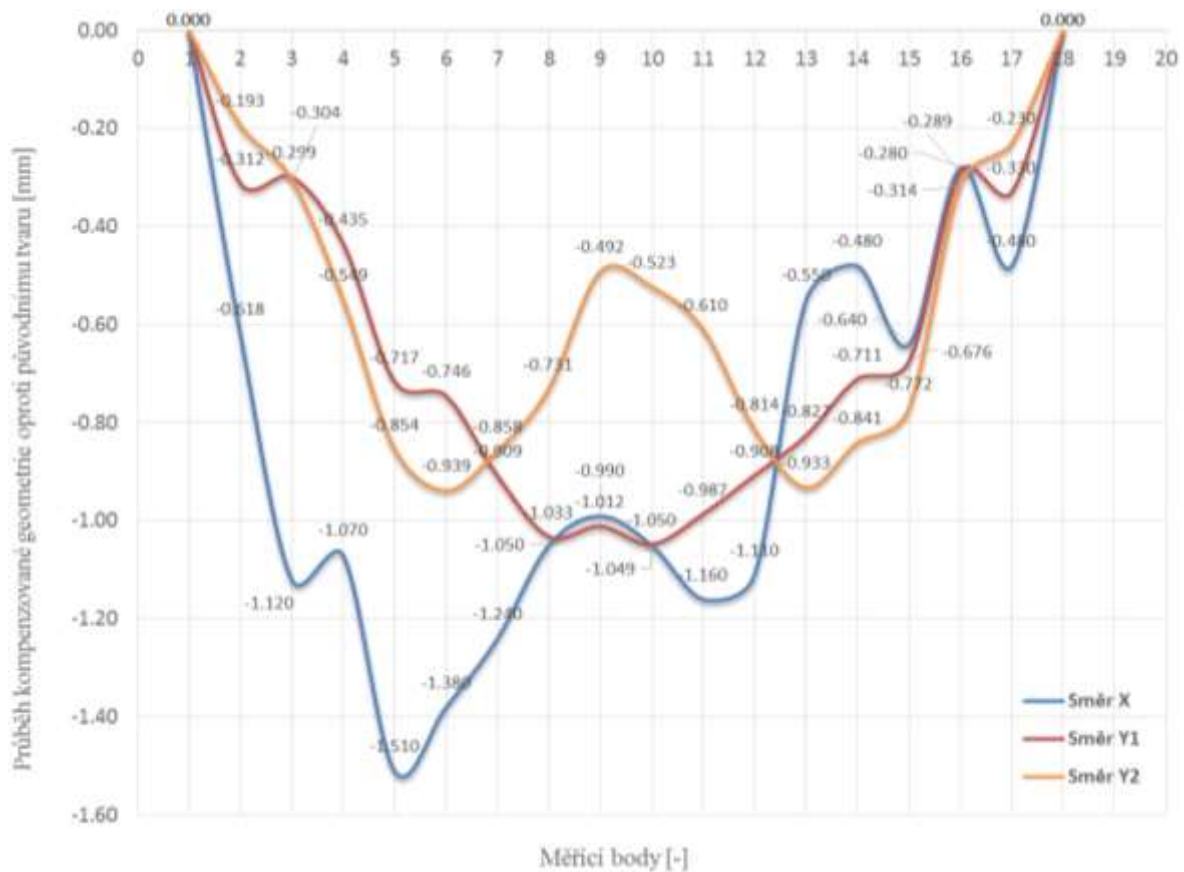
Obrázek 9.27 – Porovnání analýzy odpružení mezi naskenovaným dílem z lisovacího procesu (a) a numerickou simulací (b). [P7]

Na obr. 9.27, na kterém je zobrazen průběh kompenzace odpružení, lze sledovat viditelné zlepšení hodnot odpružení po provedení jednotlivých iteračních smyček. Po absolvování třetí iterace došlo ve všech třech oblastech ke zhoršení tvarové přesnosti. V takové fázi je ideální danou strategií kompenzace odpružení ukončit. Na základě druhé iterace, byla vygenerována geometrie kompenzovaných nástrojů. V tomto případě se jedná pouze o nástroje v tažné operaci OP20. Průběh spojitosti ploch kompenzované geometrie s naměřenými hodnotami zobrazuje obrázek 9.28. Průběh spojitosti ploch kompenzované geometrie vycházel po druhé iteraci uspokojivě. Důvodem je zvolený nízký faktor vyhlazení (hodnota 0,3), který zabránil tvorbě lokální, skokové kompenzaci geometrie ve středové oblasti dílu.



Obrázek 9.28 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]

Největších změn v geometrii, kterých bylo během kompenzace dosaženo, se pohybovaly okolo hodnot 1,5 mm v záporném směru (ve smyslu absolutního souřadného systému, směrem dovnitř vozu). Změny v geometrii do hodnot 1,5 mm oproti původní geometrii nástroje stále patří mezi relativně malé. Na obr. 9.29, na kterém je zobrazen průběhu křivosti kompenzované geometrie, si lze všimnout občasných nespojitých změn v jinak spojitěm trendu. Jedná se o změny s hodnotami 0,1 – 0,2 mm. Takto malé změny je možná během zapracování lisovacích nástrojů upravit a vyhladit.



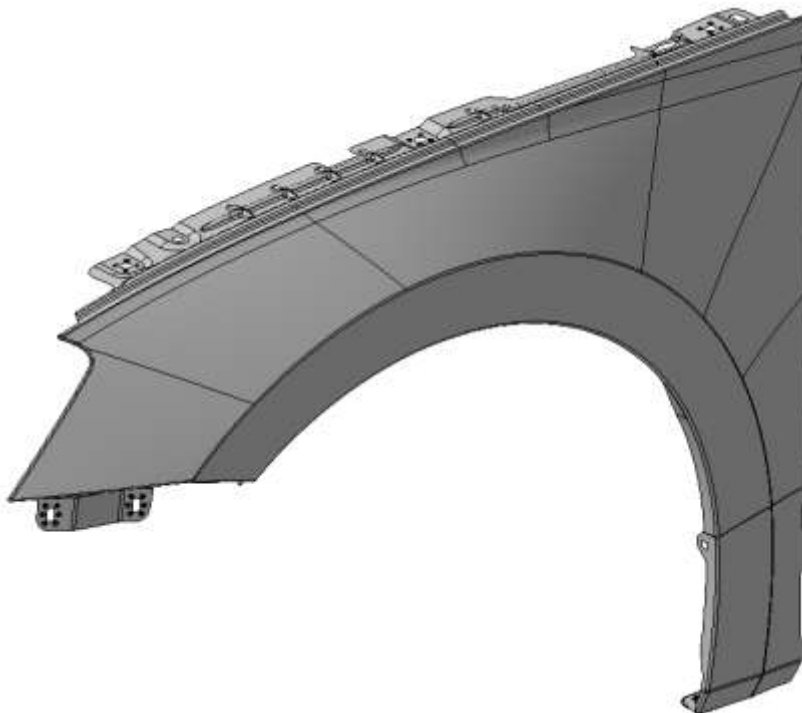
Obrázek 9.29 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci). [P7]

I přes složitou geometrii dílu a komplikovaný lisovací proces, vykazovala analýza odpružení ve vstupní numerické simulaci dostatečně vysokou přesnost s odchylkami maximálně do 1,3 mm. Po volbě vhodné strategie kompenzace a její aplikaci bylo docíleno snížení nepřesnosti dílu na maximální hodnotu 0,70 mm ve středové části dílu (limitní kritérium 0,8 mm) a na hodnotu 0,26 mm v oblasti těsnící plochy (kritérium 0,2 mm). V praxi by byl metodický plán lisovacího procesu s podobným výsledkem přijat.

Aplikaci navržené metodiky pro díl druhé kategorie se na základě provedeného ověření jeví jako úspěšná. Analýza odpružení numerické simulace se velmi přiblížila reálnému měření (mimo vrchní partie nad oknem). Zvolená strategie pro kompenzaci odpružení byla rovněž příznivá. Oproti aplikaci navržené metodiky na díl první kategorie nebylo potřeba volit a experimentovat s množstvím strategií. I přes složitější lisovací proces v následných operacích byla kompenzována geometrie nástroje jen v tažné operaci OP20. Nástroj s kompenzovanou geometrií by v praxi bylo možné díky spojitosti ploch vyrobit a zpracovat. [P7], [P11]

9.2.3 Díl 3. kategorie – blatník vozu ŠKODA Superb

V rámci ověření, zda je metodika kompenzace odpružení aplikovatelná i na složité díly, byla metodika ověřována na jednom z nejkomplicovanějších dílů v oblasti plošného tváření. V tomto případě byla metodika kompenzace odpružení aplikována na blatník vozu ŠKODA Superb třetí generace. Geometrie technického dílu je zobrazena na obr. 9.30.

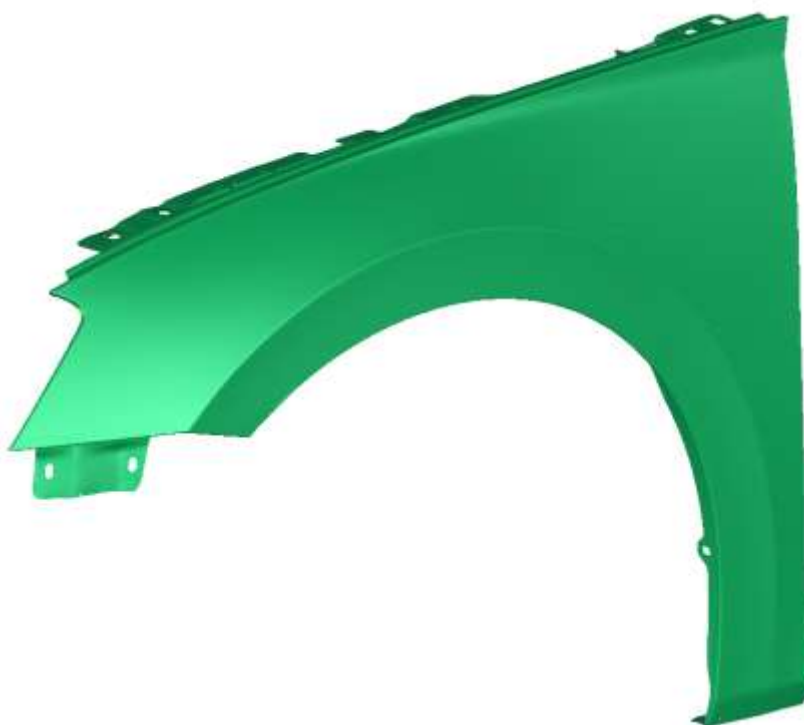


Obrázek 9.30 – Geometrie TM dílu blatníku vozu ŠKODA Superb.

Blatník vozu ŠKODA Superb je vyráběn v šesti lisovacích operacích, kde poslední lisovací operace zahrnuje tváření vyplňovacím klínem. Jedná se o tváření technologické plochy, která v karoserii vozu navazuje na díl kapoty. Více o vybraném dílu je popsáno v kapitole 5. *Volba vhodných částí karoserie pro experimentální účely*. Materiálem pro výrobu blatníku je uhlíková ocel HX220BD s dodatečným zpevněním metodou „Bake Hardening“. Tloušťka plechu u tohoto dílu je pouhých 0,6 mm. V případě tohoto dílu si lze všimnout již dříve zmíněného trendu v oblasti vývoje částí karoserie, kdy je kladen tlak na využití pevnějších materiálů vzhledem k následnému snížení hmotnosti dílů (díly o menší tloušťce materiálu). Tento trend je z pohledu odpružení nepříznivý (více o této problematice v kapitole 2.6. *Analýza okrajových podmínek*). Přehled základních parametrů numerické simulace (tabulka 16) a výsledná analýza tvařitelnosti (obr. 9.31) jsou zobrazeny dále.

Tabulka 16 – Přehled nastavení lisovacího procesu pro díl blatníku vozu ŠKODA Superb:

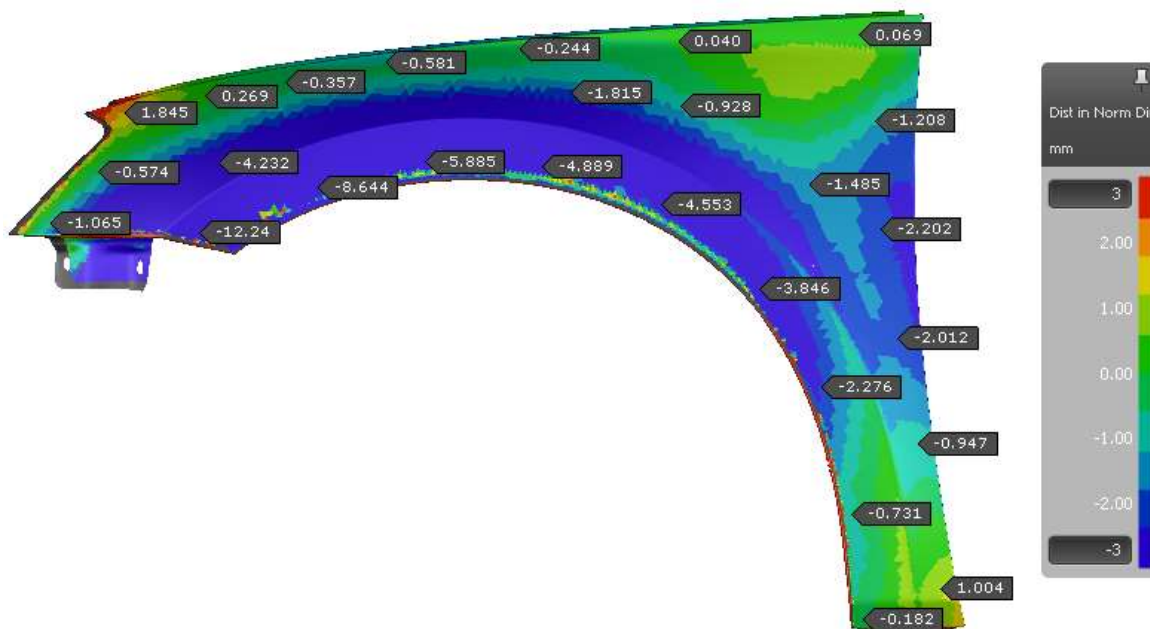
Základní nastavení numerické simulace pro díl KFL	
Materiál	HX220BD (příloha č. 4)
Tloušťka materiálu	0,60 mm
Tažení	Jednočinné
Přidržovací síla	1100 kN
Teoretická síla tažníku	2200 kN
Zdvih (Hub)	700 mm
Koeficient tření	0,15



Obrázek 9.31 – Analýza tvařitelnosti lisovacího procesu dílu blatníku vozu ŠKODA Superb
(analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvařitelnost lisovacího procesu).

Podobně jako v předchozích případech, byla ověřována přesnost virtuální analýzy odpružení. Na rozdíl od předchozích dílů, které patřily do nižší třídy složitosti, se díl blatníku typově řadí mezi díly více komplikované.

Vzhledem ke složité technologičnosti konstrukce blatníku byla předpokládána velmi malá korelace analýzy odpružení při porovnání s výsledky skutečného lisovacího procesu. Pro porovnání byl využit naskenovaný výlisek po poslední kalibrovací operaci (operace OP70). Analýza byla v numerické simulaci nastavena tak, aby se co nejvíce blížila skutečné analýze. Ověření přesnosti virtuální analýzy odpružení vzhledem ke skutečnosti je zobrazeno na obr 9.32.

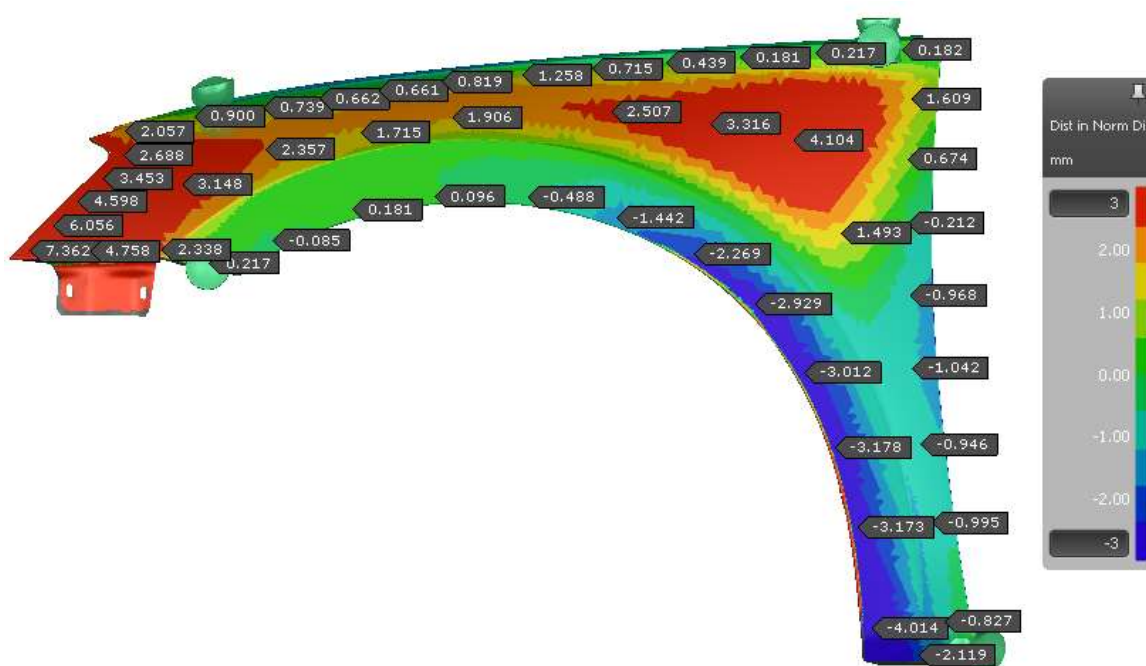


Obrázek 9.32 – Ověření přesnosti virtuální analýzy odpružení na základě porovnání naskenovaného výlisku ze skutečného lisovacího procesu s virtuální analýzou odpružení (blatník vozu ŠKODA Superb). [P7]

Korelace výsledků skutečného měření a virtuální analýzy odpružení potvrdila předem stanovenou hypotézu. Při porovnání naskenovaného výlisku s virtuální analýzou se velikost odpružení rozcházela až do hodnot 12 mm. Největší nepřesnosti bylo dosaženo v oblasti výkroje kola (oblast s pohledovou hranou). Vrchní partie výlisku (oblast, které v karoserii sousedí s kapotou vozu) dosahovala velmi dobré přesnosti v hodnotách okolo 1 mm. V normálním případě by v praxi tato analýza nebyla akceptována. V předvýrobní fázi výroby lisovacích nástrojů nemá konstruktér možnost podobného reverzního porovnání se skutečností a na základě nepřesné analýzy by mohlo v následném lisovacím procesu dojít k výrobě velkého počtu zmetků.

I přes nevyhovující přesnost virtuální analýzy odpružení bylo v experimentu i nadále pokračováno. Cílem bylo zjistit, jakých výsledků bude dosaženo při aplikaci metodiky na takto komplikovaný díl. Vstupní analýza odpružení pro následnou kompenzaci je znázorněna na obrázku 9.33. Na obrázku 9.33 je jako v případě předešlých experimentů také zobrazena finální strategie pro upnutí výlisku během měření. V tomto případě bylo zvoleno upnutí do šesti upínek. [P9]

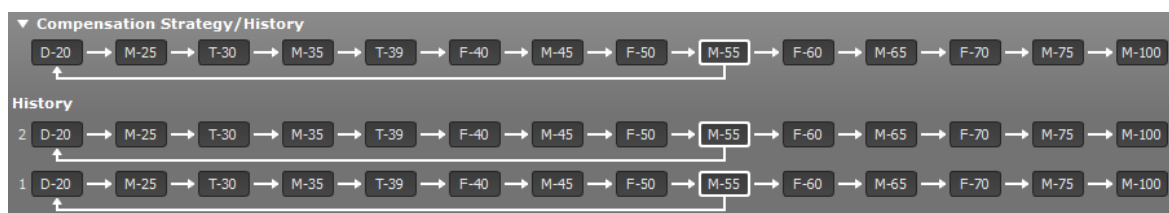
Při návrhu strategie pro ideální upnutí výlisku bylo experimentováno s různým množstvím a polohami upínek. Při použití menšího množství upínek (méně než konečných 6 upínek), docházelo k pohybu výlisku během sevření bez možnosti výlisek jinak pojistit proti pohybu. Při použití většího množství upínek naopak docházelo k uzavření výlisku a nemohlo dojít k dostatečnému uvolnění vnitřního pnutí výlisku.



Obrázek 9.33 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (díl blatníku vozu ŠKODA Superb). [P7]

Analýza odpružení dílu blatníku na obrázku 9.33 potvrzuje hypotézu, ve které byla předpokládána velmi špatná rozměrová přesnost. Odpružení dosahuje hodnot, které se pohybují až do cca 7,5 mm v kladném směru (ve smyslu směrem ven z vozu) a až do -4 mm (ve smyslu směrem do vozu). Celý tvar výlisku je navíc překroucen, dochází zde ke kombinaci odpružení typu „zkroucení - twist“ a k celkové změně tvaru. Na základě takové analýzy odpružení lze předpokládat, že kompenzace odpružení s využitím kompenzačního modulu bude komplikovaná.

Z navržených a aplikovaných kompenzačních strategií se jako optimální projevila strategie, ve které je kompenzována geometrie v tažné operaci OP20. Konečná strategie je znázorněna na obr. 9.34. Zajímavé je, že nejpříznivějších výsledků bylo dosaženo v případě, kdy byla kompenzace provedena na základě analýzy odpružení po kalibrační operaci OP50. V momentě, kdy byla jako referenční analýza brána konečná operace OP70, kompenzační modul nedokázal změnu geometrie absolutně spočítat. Výpočet musel být vždy násilně ukončen restartováním celého programu. Tabulka 17 popisuje obecné nastavení konečné kompenzační strategie pro kompenzaci odpružení blatníku ŠKODA Superb.

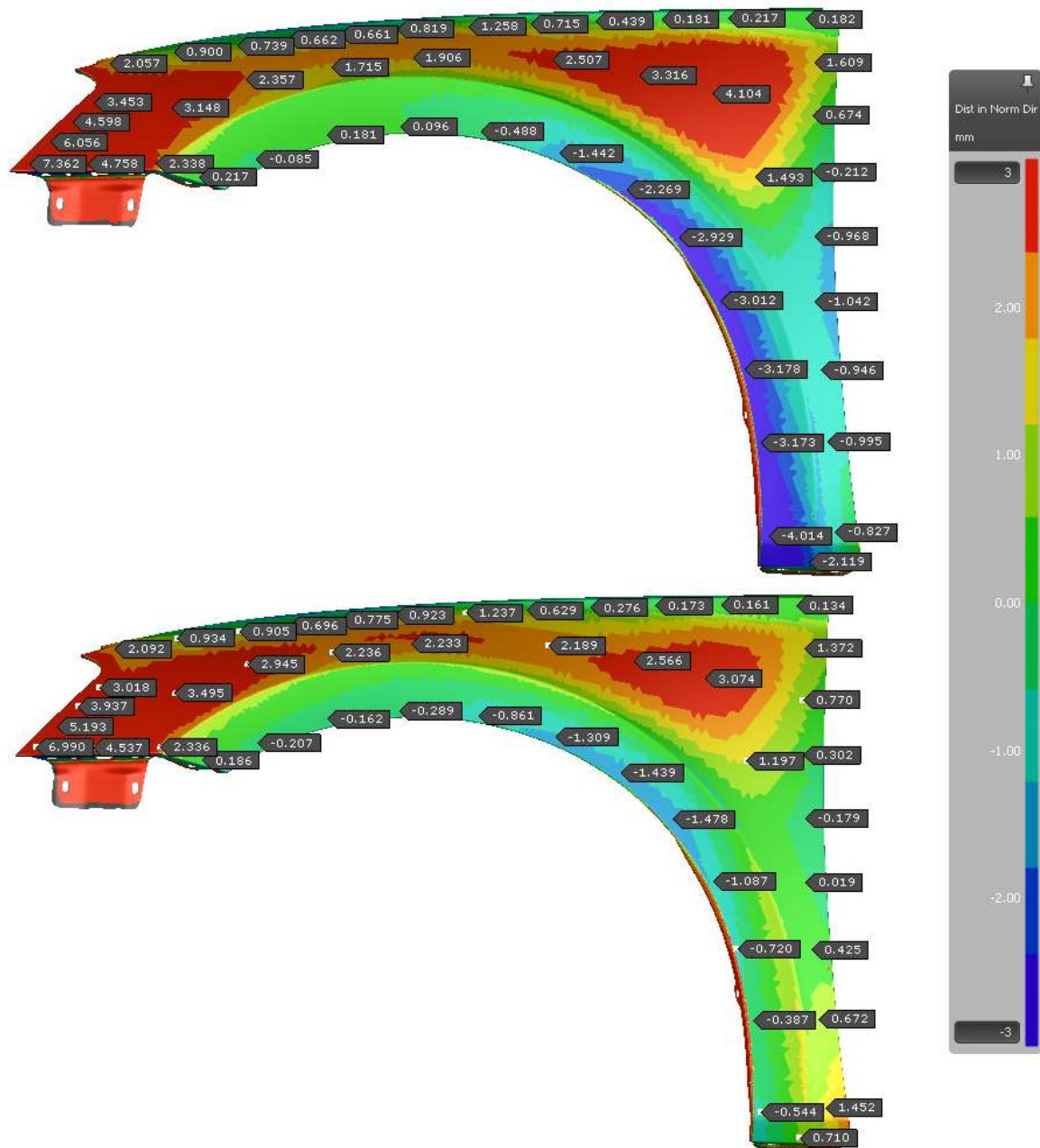


Obrázek 9.34 – Grafické zobrazení finální aplikované kompenzační strategie.

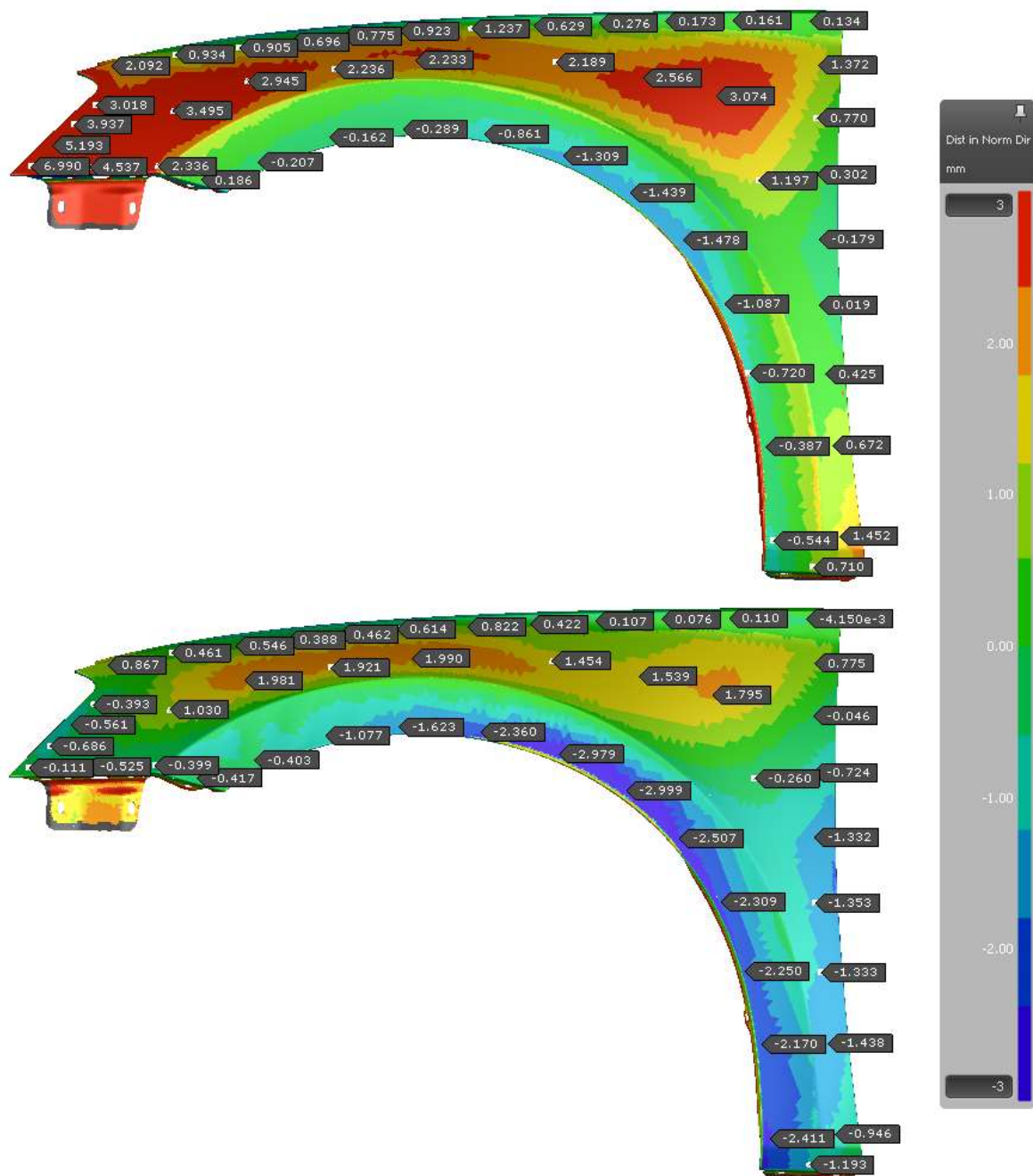
Tabulka 17 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu:

Kompenzace odpružení dílu KFL	
Kompenzace na základě analýzy v operaci	OP55 (analýza odpružení po kalibrovací operaci OP50)
Kompenzované operace	Geometrie nástrojů kompenzována v tažné operaci OP20
Počet RPS bodů při analýze odpružení	6
Kompenzační faktor	1
Faktor vyhlazení	0,4 (z důvodu velikého odpružení zvolen vyšší faktor)
Počet iterací	3
Povolená geometrická nepřesnost	0,8 / 0,2 mm

Následující snímky (obr. 9.35 – 9.36) zobrazují analýzu odpružení blatníku ŠKODA Superb po jednotlivých kompenzačních iteracích.



Obrázek 9.35 – Analýza odpružení v jednotlivých iteracích kompenzace,
 a) analýza odpružení vstupní nekompenzované numerické simulace,
 b) analýza odpružení po první iteraci kompenzace odpružení. [P7]



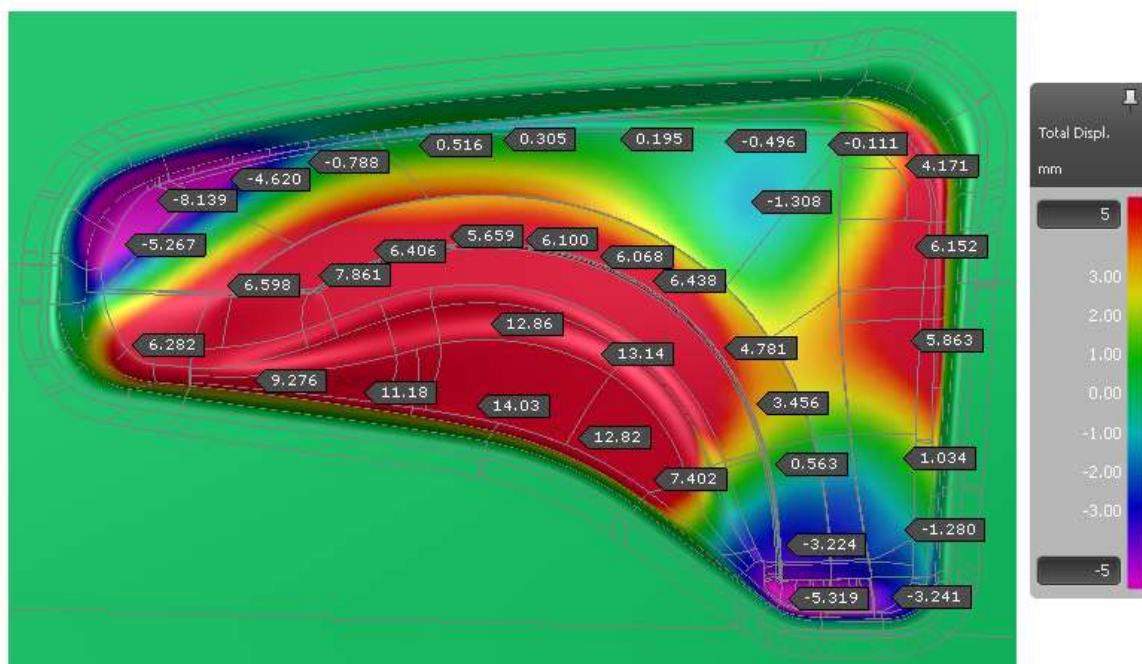
Obrázek 9.36 – Analýza odpružení v následných iteracích kompenzace,

a) analýza odpružení po druhé iteraci kompenzace odpružení,

b) analýza odpružení po třetí iteraci kompenzace odpružení. [P7]

V rámci ověření metodiky kompenzace odpružení dílu třetí kategorie **nebylo** dosaženo požadovaných hodnot na přesnost výlisku (maximální požadovaná nepřesnost 0,8 mm). Po poslední iteraci zvolené kompenzační strategie se největší hodnoty odpružení stále pohybovaly na hranici cca 3 mm. I přes to, že se v tomto případě ukázala metodika jako méně neefektivní, bylo i zde docíleno výrazného snížení již tak kritického odpružení. Maximální hodnoty odpružení byly sníženy z hodnot 7,5 mm na 3 mm.

Aby došlo k tak velikému snížení odpružení, musela být kompletně modifikována geometrie tahového modelu v operaci OP20. Na obrázku 9.37 je možné porovnat velikost geometrických změn na tažném nástroji po poslední provedené iteraci kompenzace. Geometrie nástroje by v tomto případě musela být upravena až o 14 mm. Tak velká změna geometrie by se navíc dotkla všech následných operací, včetně geometrie kalibrů a vyplňovacích klínů. Jednalo by se o **časově i finančně velmi nákladnou korekci**. [P11]



Obrázek 9.37 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]

Oproti předešlým případům nemělo v tomto případě význam provádět analýzu průběhu spojitosti ploch kompenzované geometrie. Aplikace navržené metodiky na takto tvarově a procesně komplikovaný díl jen potvrdila předpoklad, že s pomocí současných virtuálních nástrojů je kompenzace odpružení v takovém případě velmi složitá. Zjištěné výsledky by bylo v praxi možné přijímat jen informativně. Navíc při pohledu na časové nároky si v porovnání s ostatními třídami složitosti aplikace navržené metodiky vyžádala nejvíce času (přibližně 4 týdny, bez zapracování korekcí do metodického plánu). [P7], [P11]

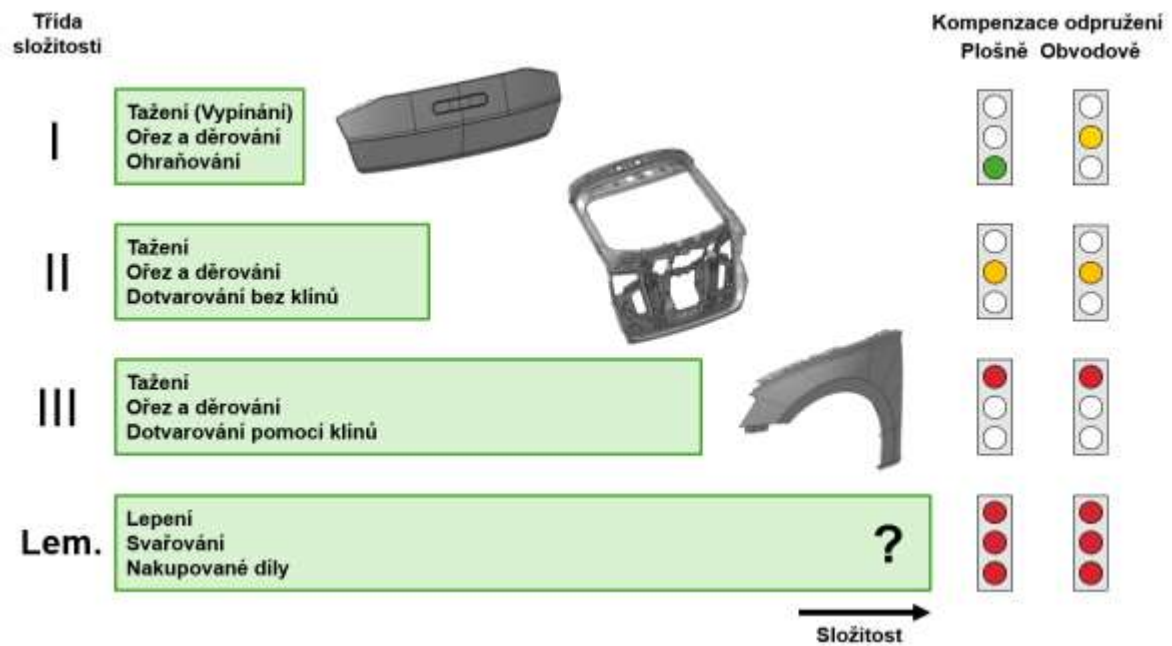
9.3 Zhodnocení aplikované metodiky kompenzace odpružení

V kapitole 9.2 *Ověření metodiky kompenzace odpružení* bylo provedeno ověření navržené metodiky nastavení numerické simulace, analýzy a kompenzace odpružení. Navržená metodika byla aplikována na vybrané díly, které jsou aktuálně vyráběny v závodě ŠKODA AUTO. Cílem těchto experimentů bylo primární ověření účinnosti navržené metodiky a zároveň získání informace ohledně časových nároků.

V případě prvních dvou dílů (páté dveře vnitřní a vnější) bylo dosaženo velmi dobrých výsledků jak v porovnání výsledků numerické simulace s reálným měřením, tak v následné kompenzaci odpružení. V obou případech se podařilo díky navržené metodice kompenzace odpružení snížit velikost nepřesnosti na maximální hodnoty okolo 0,6 mm. Zároveň byla během kompenzace odpružení dodržen požadavek na pravidelnost křivosti ploch, který má významný vliv na následnou vyrobitelnost lisovacího nářadí.

V případě třetího dílu bylo v rámci ověřování dosaženo snížení velikosti odpružení, avšak dosažené hodnoty nespĺňovali požadované kritéria na přesnost výlisku. I přes návrh a aplikaci různých strategií pro analýzu (zejména modifikace polohy upnutí do upínek) a kompenzaci odpružení tak nebylo dosaženo požadovaných hodnot. Vybraný díl blatníku byl již na začátku návrhu přístupu k problematice odpružení zařazen do třetí třídy podle složitosti dílu. Tato kategorie je významná nejen z pohledu komplikovanosti odpružení, ale také z pohledu celého lisovacího procesu. Řešení virtuální kompenzace odpružení u dílů třetí kategorie je za použití současných virtuálních nástrojů **méně efektivní než v případě předchozích dvou tříd.**

Celkové zhodnocení aplikované metodiky pro analýzu a kompenzaci odpružení je graficky zobrazeno pomocí schématu na obr. 9.38. Jednotlivé díly byly použity jako zástupce za danou kategorii. V případě první a druhé kategorie, resp. třídy složitosti, lze za pomoci současných virtuálních nástrojů relativně efektivně a přesně řešit problematiku odpružení. V případě třetí kategorie tomu ovšem možné není. Do ověření navržené metodiky kompenzace nebyly zahrnuty technologické plochy stojin. S těmito plochami není v praxi takový problém jako s hlavním tvarem výlisku. Na technologické stojiny lze velmi dobře aplikovat metodiku podobnou jako u kompenzace odpružení u jednoduchého ohybu. [P11]



Obrázek 9.38 – Schéma účinnosti virtuálního řešení kompenzace odpružení v závislosti na třídě složitosti dílu (Legenda statusu – zelená = modifikované řešení je možné využít v praxi, žlutá = modifikované řešení je možné využít v praxi s výhradami a možnými komplikacemi, červená = modifikované řešení v současné době nelze využít v praxi). [P11]

Dále byla do schématu zahrnuta samostatná kategorie pro řešení lemovaných sestav, které se skládají z více dílů. I v těchto případech je do budoucna potřeba řešit problematiku odpružení. Při řešení kompenzace odpružení lemovaných sestav je ovšem počítáno s dvěma výlisky o různé rozměrové přesnosti, která ovlivňuje korektnost samotného slícování dílů. V současné době jsou virtuální nástroje pro tuto kategorii teprve ve fázi vývoje a ověřování. Jejich funkčnost nebyla dodnes plně implementována do předvýrobního procesu lisovacího a lemovacího náradí. [P11]

9.4 Diskuze k přínosu navrženého modifikovaného řešení

Navržená metodika analýzy a kompenzace odpružení má **jednoznačný přínos** k dané problematice kompenzace odpružení. Využití virtuálních nástrojů pro řešení návrhu lisovacích procesů je v dnešní době běžné, ale historie těchto metod není až tak veliká. Do dnešní doby se jen málo autorů zabývalo komplexní metodikou pro přístup k problematice odpružení. Většina autorů se zabývala popisem odpružení z pohledu velmi jednoduchých experimentů. Takové experimenty byly zaměřeny převážně na jednotlivé okrajové podmínky.

Jedná se např. o experimenty s jednoduchým ohybem materiálu, tažením U profilu, tažením symetrické nádoby nebo kalíšku, apod. [43], [44], [45], [50], [51]

Hlavním nedostatkem těchto experimentů je jejich velmi malé využití ve skutečném lisovacím procesu. Okrajové podmínky lisovacího procesu se navzájem ovlivňují a nelze je uvažovat jako samostatné parametry. Navržená a v této práci popsána metodika popisuje modifikované řešení přístupu k problematice odpružení z globálního pohledu jak výpočetních, tak procesních parametrů. Velikým přínosem metodiky je standardizace nastavení numerických simulací s cílem zpřesnění konečné virtuální analýzy odpružení. Ke standardizaci slouží navržené standardy pro numerickou simulaci (kapitola 7.2 *Návrh standardů pro nastavení numerické simulace*) a kontrolní list numerické simulace (příloha 1). Vypovídající je pohled na časové porovnání stávajícího přístupu k problematice kompenzace odpružení a modifikovaného řešení. Pro porovnání byly vybrány představitelé první a druhé třídy výlisků. Třetí třída nebyla do porovnání zahrnuta, jelikož se metodika při ověření aplikovatelnosti neprojevila jako účinná. Porovnání stávajícího přístupu s navrženou metodikou je zobrazeno v tabulce 18. [P11]

Tabulka 18 – porovnání současného přístupu k problematice odpružení s nově navrženou metodikou s využitím virtuální kompenzace odpružení [P11]

Přístup	Popis činnosti	Páté dveře spodní vnější [hod]	Páté dveře vnitřní [hod]
Stávající přístup	Návrh rozsahu bombírování podle výsledků z analýzy odpružení (na základě zkušeností metodářů a metrologických specialistů)	5	10
	Zpracování korekce do metodického plánu	45	200
	Ověření v numerické simulaci	15	80
	Hodiny celkem	65	290
Přístup podle navržené metodiky	Kompenzace odpružení pomocí speciálního výpočetního modulu	40	50
	Zpracování korekce do metodického plánu	10	100
	Ověření v numerické simulaci	10	20
	Hodiny celkem	60	170

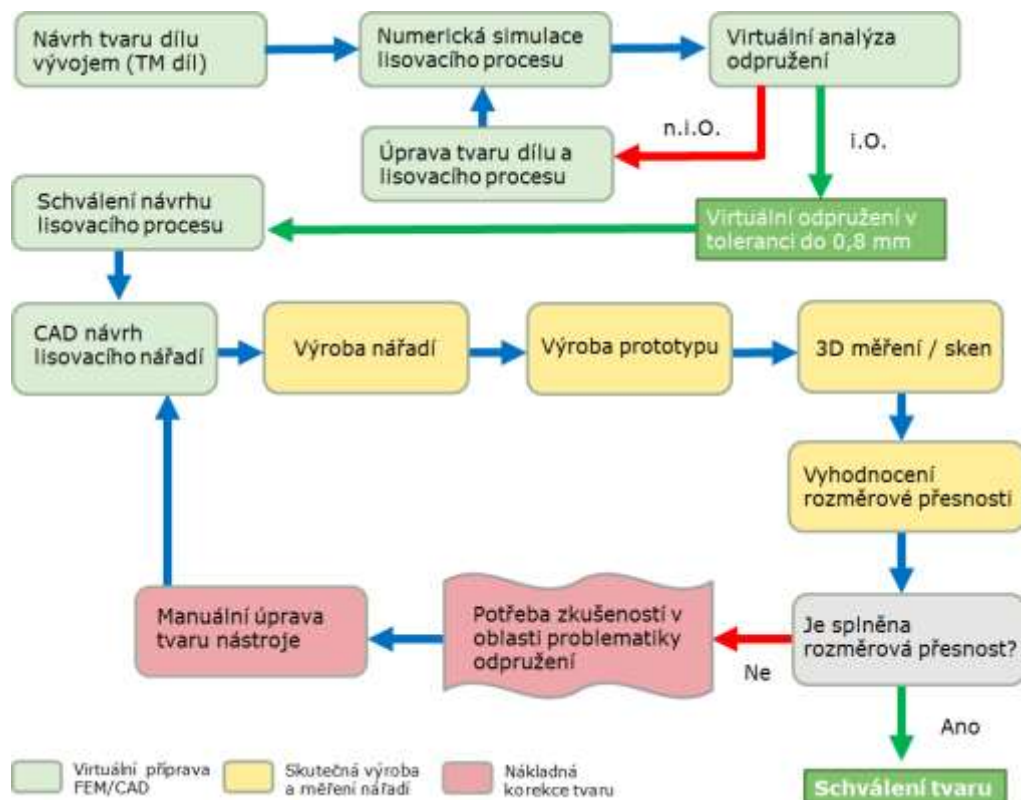
Z porovnání v tabulce 18 jednoznačně vyplývá, že stávající přístup k problematice odpružení je časově náročnější. Největších časových rozdílů bylo dosaženo při činnosti, při které jsou zpracovány korekce do dat nástrojů do metody lisovacího procesu.

Zejména u dílů s vyšší třídou složitosti. Při současném přístupu musí konstruktér ručně upravovat geometrii tahového modelu (tzv. bombírování). V případě využití speciálních výpočetních modulů, jako např. AutoForm Compensator nebo PAM-STAM Compensator, je kompenzovaná geometrie automaticky vymodelována podle zadaných parametrů. I takovém případě musí být provedeno následné zpracování geometrie. Ovšem časová náročnost korekcí je v takovém případě méně náročná. Na úpravu dat je potřeba přibližně polovina času oproti současnému přístupu (jedná se spíše jen o opravu a případné vyhlazení dat).

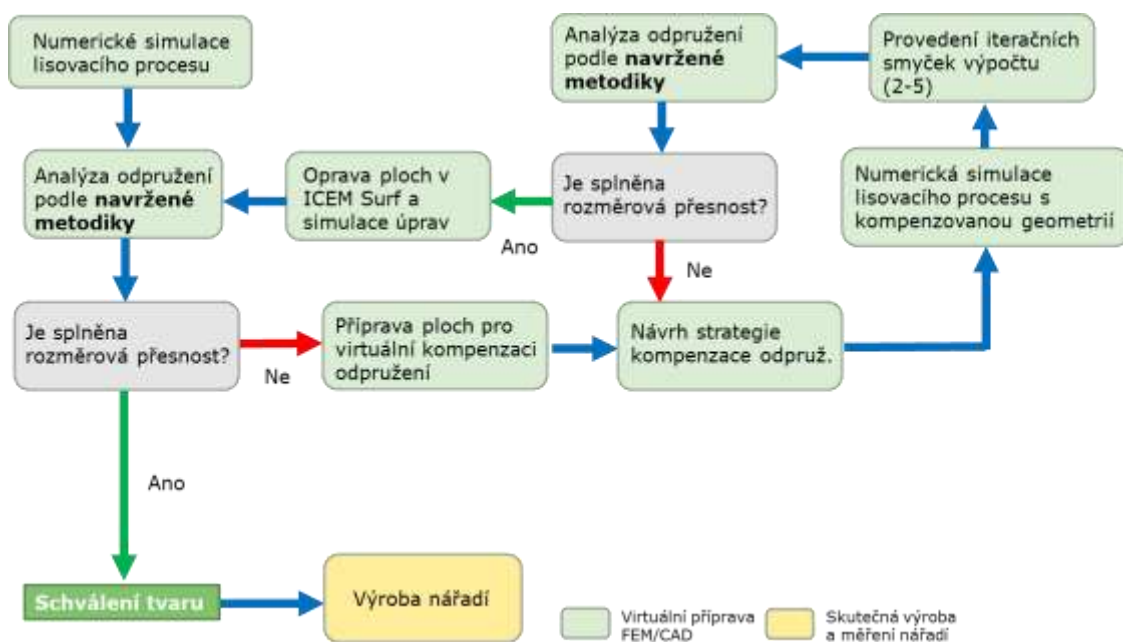
U dílů s méně složitou geometrií nebylo dosaženo tak velikých časových rozdílů (díl vnějších spodních pátých dveří – současný přístup 65 hod, modifikované řešení 60 hod). Důvodem je méně komplikovaná korekce dat oproti složitějším dílům. Naopak časová náročnost na návrh, volbu a aplikaci kompenzační strategie v případě navržené metodiky je velmi podobná jako u dílů se složitější geometrií. Bohužel je velmi obtížné dopředu odhadnout časovou náročnost činnosti, která zahrnuje práci s virtuální kompenzací odpružení. Důkazem jsou provedené experimenty, kdy u dílu s jednodušší geometrií (vnější spodní páté dveře) vznikl problém s volbou strategie pro ideální kompenzací odpružení (navrženo a aplikováno více jak 10 strategií). Oproti tomu u dílu se složitější geometrií (vnitřní páté dveře) tento problém nevznikl a uspokojivých výsledků bylo dosaženo po návrhu a aplikaci třech strategií. V průměru je na kompenzací odpružení vyhrazeno pět pracovních dní, tedy cca 40 hodin.

I přes jednoznačný přínos v podobě časových úspor při řešení problematiky odpružení stále visí ve vzduchu otázka **použitelnosti kompenzované geometrie**. Jak již bylo popsáno v kapitolách 9.2.1 a 9.2.2, následné obrábění geometrie a zejména zpracování nástrojů na základě virtuální kompenzace, je oproti současnému přístupu obtížnější. Možným řešením je nízký **kompenzační faktor**, tím je ale výpočtovému modulu snižována možnost lokální kompenzace a tedy i efektivnosti. Dalším možným řešením je využití speciálních vyhlazovacích programů, jako např. ICEM Surf. Rozdíl mezi současným přístupem k problematice odpružení a modifikovaným řešením s využitím navržené metodiky lze porovnat pomocí schémat na obrázku 9.39 a 9.40. Hlavním rozdílem současného a modifikovaného přístupu je fáze projektu, ve které je problematika odpružení řešena.

V současném přístupu je odpružení řešeno nákladnými korekcemi až ve fázi projektu, kdy jsou lisovací nářadí odlité nebo úplně vyrobené. Naopak modifikované řešení posouvá řešení problematiky odpružení do předvýrobní fáze projektu a dochází k výraznému snížení finančních a časových nákladů. [P11]



Obrázek 9.39 – Schéma současného přístupu k problematice odpružení v praxi.



Obrázek 9.40 – Schéma modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení s využitím navržené metodiky.

10. Závěr

Předkládaná disertační práce poskytuje informace teoretického a experimentálního charakteru v přístupu k problematice odpružení. Pozornost práce byla věnována jak samotné problematice odpružení materiálu, tak okrajovým podmínkám, které tento jev více, či méně ovlivňují. **Hlavním cílem předkládané disertační práce bylo provedení návrhu a ověření modifikovaného řešení v přístupu k problematice odpružení.** Modifikované řešení ke splnění svých cílů využívá navržené metodiky a numerických simulací. Před provedením návrhu optimální metodiky byla provedena teoretická rešerše současné literatury s cílem objasnění teorie vzniku odpružení. Na základě provedené rešerše problematiky bylo v rámci výzkumu možné navrhnout metodiku pro analýzu a kompenzaci odpružení.

Podstatnou částí předkládané disertační práce tvoří ověřování využití numerických simulací (viz kapitola 3. *Numerické simulace* a 7. *Problematika vyhodnocení odpružení v oblasti lisovacích procesů*). I přes to, že v současné době praxe běžně využívá numerické simulace k návrhu a analýze lisovacích procesů, jejich korelace se skutečným procesem není stále optimální. Během výpočtu fyzického modelu daného problému dochází ke zjednodušování většiny okrajových podmínek. Toto má obecně za následek zhoršenou přesnost numerických simulací. Tato hypotéza byla v rámci experimentální části práce potvrzena, konkrétně v případě porovnání virtuální analýzy odpružení výlisku se skutečným měřením. Na základě provedené teoretické rešerše a provedených experimentů bylo zjištěno, že pro docílení uspokojivé přesnosti analýzy odpružení, by mělo být zabráněno zjednodušování okrajových podmínek. Tím na jednu stranu dochází k několikanásobně vyšším výpočtovým časům a nárokům na datová úložiště, ale jedině tímto způsobem dojde k přiblížení se virtuálního výpočtu ke skutečnému lisovacímu procesu (kapitola 6.3.3 *Závislost nastavení výpočetní sítě na přesnost numerické simulace*). V rámci metodiky tak byly navrženy standardy pro optimální nastavení numerické simulace (kapitola 7.2 *Návrh standardů pro nastavení numerické simulace*) a kontrolní list pro provedení kontroly (příloha 1), pro ověření, zda byla numerická simulace nastavena správně (viz kapitola 8.3 *Nastavení numerické simulace s ohledem na okrajové podmínky lisovacího procesu*). Díky navrženým podmínkám a standardům a výše popsanou částí práce **byl splněn dílčí cíl číslo 1. Objasnění problematiky odpružení.** [P1], [P2], [P6]

První částí modifikovaného řešení byl návrh metodiky, která popisuje problematiku analýzy odpružení (viz kapitola 7.1 *Současné přístupy k analýze odpružení*). Cílem metodiky je optimálním způsobem vyhodnotit velikost odpružení, a to bez vnesení vnějších vlivů, kterými jsou např. gravitace vlastní hmotnosti výlisku nebo špatným upnutím výlisku do přípravku. Na základě provedených experimentů byla stanovena metodika, která zahrnuje podmínky a pravidla pro optimální vyhodnocení odpružení (kapitola 7.3 *Návrh metodiky analýzy odpružení*). V oblasti karosářských výlisků je stanovení jedné optimální metodiky prakticky nemožné. Technologičnost konstrukce jednotlivých dílů se výrazně liší, tím se také liší samotný lisovací proces a smysl odpružení. Pro každý díl se následně používá jiná strategie upnutí do měřicího přípravku. Obecně se ale doporučuje vyhodnocovat odpružení v totožné poloze dílu, jako na vozidle. Současně je doporučeno při vyhodnocení upnout výlisek do přípravku jen pomocí nezbytného počtu upínek (3-6). Optimální upnutí výlisku je takové, aby bylo zaručeno zamknutí pohybu výlisku ve všech třech směrech, ale aby měl výlisek stále prostor pro uvolnění vnitřního pnutí, které způsobuje vznik odpružení. **Popisem podmínek analýzy odpružení a návrhem metodiky byla splněna část hlavního cíle práce, návrhu modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení.** [P7], [P8]

Druhá část modifikovaného řešení je zaměřena na návrh metodiky kompenzace odpružení s využitím numerické simulace (kapitola 9.1 *Návrh strategie pro kompenzaci odpružení*). Tato část metodiky počítá s využitím speciálních výpočtových modulů, jakým je např. AutoForm Compensator nebo modul v programu PAM-STAMP. Ke kompenzaci odpružení je možné přistoupit ve fázi, kdy je optimalizována numerická simulace lisovacího procesu. Další podmínkou je provedení analýzy odpružení podle navržené metodiky a docílení smysluplných výsledků při porovnání s technickým dílem. Následuje návrh a volba optimální strategie pro kompenzaci odpružení. Ke každému dílu musí být přistupováno individuálně, není možné definovat jednu optimální strategii. V případě, že pomocí jedné ze zvolených strategií není docíleno uspokojivé kompenzace odpružení, je potřeba zvolit jiný přístup. V některých případech je odpružení tak komplikované, že nalezení vhodného řešení zahrnuje realizaci několika strategií. Během experimentů bylo docíleno optimálních výsledků při kompenzaci odpružení pouze v poslední kalibrovací operaci. V takovém případě není potřeba úpravy geometrie v předcházejících operacích. Pokud je prováděna kompenzace např. v tažné operaci OP20, je potřeba následně provést optimalizaci kalibračních klínů a střižných křivek ve všech následných operacích.

Návrhem metodiky virtuální kompenzace odpružení byla splněna druhá část hlavního cíle práce. Tím byl splněn hlavním cíl práce, kterým je návrh modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení. [P7], [P8]

Konečná část předkládané disertační práce byla věnována ověření modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení s pomocí navržené metodiky (kapitola 9.2 *Ověření metodiky kompenzace odpružení*). Ověření bylo realizováno na vytipovaných dílech vozů koncernu Volkswagen o různé technologičnosti konstrukce a o různé složitosti lisovacího procesu. K ověření navržené metodiky byl použit díl pátých vnitřních a vnějších spodních dveří vozu SEAT Ateca a díl blatníku vozu ŠKODA Superb. Vytipované díly byly vybrány jako představitelé vlastní třídy podle složitosti. Lze shrnout, že v případě prvních dvou dílů, **1.** (vnější páté dveře spodní) a **2.** (vnitřní páté dveře) **třídy složitosti**, byla aplikace modifikovaného řešení úspěšná. V obou případech bylo docíleno kompenzace odpružení na hodnoty do 0,6 mm. Zároveň bylo díky nízkému faktoru vyhlazení dosaženo relativně rovnoměrné geometrie bez lokálních změn v křivosti. V případě dílu blatníku, který byl zařazen do **3. třídy** složitosti, nebylo docíleno uspokojivých výsledků. Po kompenzaci odpružení bylo stále naměřeno odpružení s hodnotami okolo 3 mm (původní odpružení dosahovalo hodnot až 7,5 mm). I přes zlepšení odpružení o cca 4,5 mm by v praxi byla kompenzace odpružení v takovém případě stanovena jako nevyhovující. V současné době jsou v praxi s dodržáním rozměrové přesnosti u dílů patřící do 3. třídy složitosti závažné problémy. Ani s pomocí modifikovaného řešení a s využitím numerických simulací nebylo dosaženo ideálního zlepšení. Celkové zkušenosti s úspěšností aplikované metodiky byly shrnuty do schématu, který je zobrazen na obr. 9.38. Do schématu byla navíc zahrnuta samostatná třída složitosti, do které se řadí lemované sestavy dílců. V poslední době se otevírají diskuze i na téma řešení problematiky odpružení i u sestav dílů. Ovšem nalézt virtuální řešení odpružení pro podobně složité modely v podobě sestav je pomocí současných nástrojů prakticky nemožné. [P7], [P8]

Navržené modifikované řešení s využitím metodiky analýzy a kompenzace odpružení lze po realizaci ověřovacích experimentů a ověření označit jako **velmi přínosné**. Při porovnání se současným řešením je navržené modifikované řešení jednoznačně příznivější, jak z pohledu výsledné rozměrové přesnosti, tak z pohledu časové náročnosti. U dílů se středně složitou technologičností konstrukce (díly 2. třídy složitosti) bylo dosaženo časových úspor okolo 30%. Podrobnější porovnání je zobrazeno v tab. 18. S aplikací navrženého modifikovaného přístupu ovšem vzniká nová problematika. Kvalita ploch po virtuální kompenzaci nesplňuje parametry pro výrobu lisovacích nářadí.

Ve většině případů musí být pro využití kompenzovaných ploch provedeno vyhlazení tvaru, např. pomocí speciálního programu ICEM Surf. Více o problematice aplikovatelnosti navržené metodiky je popsáno v kapitole 9.3 *Zhodnocení aplikované metodiky kompenzace odpružení* a v kapitole 9.4 *Přínos modifikovaného řešení s využitím navržené metodiky analýzy a kompenzace odpružení*. [P11]

Realizací zkušebních experimentů, jejich ověřením a zhodnocením na základě porovnání se současným přístupem bylo navržené modifikované řešení problematiky odpružení označeno jako přínosné. **Tímto byly splněny dílčí cíle práce, které se zabývaly zejména ověřením navrženého modifikovaného řešení současného stavu v přístupu k problematice odpružení. Jedná se o dílčí cíle č. 2. *Ověření modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení* a č. 3. *Porovnání současného a modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení*.** Tím lze shrnout výsledky disertační práce do závěrečné hypotézy, která říká, že úprava a zpřesnění okrajových podmínek lisovacího procesu vede jednoznačně ke zkvalitnění a zvýšení přesnosti konečného výlisku.

I přes to, že v některých případech nebylo docíleno ideálních výsledků v přesnosti analýzy a kompenzace odpružení, je navržené modifikované řešení pro současnou praxi velikým přínosem. Díky modifikovanému řešení současného stavu je možné docílit výrazných časových a finančních úspor. K docílení optimální kompenzace odpružení, ať už virtuální nebo pomocí ručního modelování, by měla být problematice věnována jednoznačná pozornost i dále. V budoucnu je potřeba více řešit problematiku momentálně zjednodušovaných parametrů a podmínek v rámci numerické simulace. Cestou ke zlepšení přesnosti numerických simulací je tak přiblížení virtuálního výpočtu blíže ke skutečnému tvářecímu procesu. Takovéto výpočty jsou za použití současné výpočetní techniky velmi náročné a v budoucnu budou vyžadovat stále výkonnější výpočtové stanice, které proces výpočtu urychlí. Podobná témata mohou být námětem pro další výzkum v této oblasti. [P7], [P11]

Seznam použité literatury

- [1] MOCEK, K. 3. Struktura a vlastnosti materiálu a jejich zkoušení: Nauka o materiálu. ČVUT v Praze, Fakulta strojní, 2014.
- [2] HLAVATÝ, I. a J. HRUBÝ. *Technologičnost konstrukcí: Nauka o materiálu*. Ostrava, Technická univerzita Ostrava, 2012.
- [3] VRBKA, M. a VEVERKA, M.. Metoda konečných prvků: Ansys. Brno. Dostupné také z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [4] LIU, R.G.D.a.Y.C., *Control of Springback in a Flanging Operation*. APPLIEDMETALWORKING, January 1984.
- [5] CHEN, F.K. a S.F. KO, Deformation Analysis of Springback in L-Bending of Sheet Metal. *Advanced Science Letters*, 2011. (6-7).
- [6] YOSHIDA, T. *Material Modeling for Accuracy Improvement of the Springback Prediction of High-strength Steel Sheets*. NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT. 2013, **102**. Dostupné také z: http://www.nssmc.com/102_12_Yoshida.pdf
- [7] *AutoForm Solution Overview*. AutoForm - Forming Reality [online]. 2015 [cit. 2015-11-29]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/products/solution-overview/>
- [8] THOMMA, M. AUTOFORM ENGINEERING GMBH. Springback Compensation with AutoForm 4.1 Version. Zurich, 2016. Dostupné také z: http://www.autoform.com/en/pdf/news/PressRelease_060816_01.pdf
- [9] LING, Y.E., H.P. LEE a B.T. CHEOK. Finite element analysis of springback in L-bending of sheet metal. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2005, 168(2): 296-302 [cit. 2015-12-13]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.236. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924013605002876>
- [10] INGJING, Xu, *et al.* Springback Prediction in Sheet Metal Forming Combined Finite Element Method with Data Mining Technique [online]. 2002, 9 [2016-06-03]. <http://www.ansys.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/>
- [11] AKADEMIE TVÁŘENÍ: *Odpružení v plošném tváření*. 2011, roč. 2011, č. 5. DOI: 110540. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-odpruzeni-v-plosnem-tvareni.html>
- [12] ASM HANDBOOK, Volume 14b - Metalworking: Sheet Forming. Ohio: ASM International, 2006. ISBN ISBN-13: 978-0-87170-710-9.
- [13] ŠETINA, Petr. *Možnosti korekce tvaru nástrojů pro jednotlivé typy odpružení*. Praha, 2006. Diplomová práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní.
- [14] LEU, Daw-Kwei a Zhi-Wei ZHUANG. Springback prediction of the vee bending process for high-strength steel sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2016, **30**(3), 1077-1084. DOI: 10.1007/s12206-016-0212-8. ISSN 1738-494x. <http://link.springer.com/10.1007/s12206-016-0212-8>
- [15] BENSON, S. *Bending Basics: The hows and whys of springback and springforward*. The Fabricator. 2014. Dostupné také z: <http://www.thefabricator.com/article/bending/bending-basics-the-hows-and-whys-of-springback-and-springforward>

- [16] AACHEN UNIVERSITY, DEPARTMENT OF FERROUS METALLURGY. Springback of high strength automotive steels. *Aachen*. Dostupné také z: <http://www.iehk.rwth-aachen.de/index.php?id=503>
- [17] KRATINA, J. Mechanické vlastnosti pevných látek: Mechanické vlastnosti vybraných pevných látek, modul pružnosti v tahu, modul pružnosti ve smyku, Poissonovo číslo. [online]. [cit. 2015-12-27]. Dostupné z: <http://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/mechanicke-vlastnosti-pevnych-latek>
- [18] BROŽOVSKÝ, J. a A. MATERNA. Základy matematické teorie pružnosti. *TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA A ZÁPADO-ČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI. Plzeň, 2012, s. 123*. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/mat_teorie_pruznosti.pdf
- [19] Integrated Forming Simulation System for Virtual Tool Shop: Functions and Features. JSOL Corporation [online]. Tokyo [cit. 2015-12-20]. Dostupné z: <http://www.jstamp.jp/en/products/nv/index.html>
- [20] TEKINER, Zefer. *An experimental study on the examination of springback of sheet metals with several thicknesses and properties in bending dies*. Journal of materials processing technology. 2001. DOI: 145 (2004) 109–117.
- [21] S.W. LEE and D.Y. YANG. An assessment of numerical parameters influencing springback in explicit finite element analysis of sheet metal form.
- [22] MUTHLER, A. *Berechnung der elastischen Rückfederung von Tiefziehbauteilen*. München, 2005. *Dizertační práce. Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München*.
- [23] WEIHER, J., et. al. *Controlling Springback With Compensation Strategies*. Numiform. Berlin, 2004, 5. Dostupné také z: <http://doc.utwente.nl/76532/1/numiform2004.pdf>
- [24] TANG, L., et. al. *Advanced high strength steel springback optimization by projection-based heuristic global search algorithm*. *Materials and Design.*, 2013(43), 12. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/profile/Hu_Wang6/publication/257086310_Advanced_high_strength_steel_springback_optimization_by_projection-based_heuristic_global_search_algorithm/links/559f17d708ae97223ddc5cee.pdf
- [25] AUTOFORM ENGINEERING GMBH. AutoForm R6 – Compensator. [online]. 2014 [cit. 2015-02-11]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/products/autoform-compensator-plus/>
- [26] ATLAS TOOL Inc., *Develops a Sounds Springback Compensation Process with the Help of Pam-Stamp 2G Software*, ESI Group.
- [27] LINGBEEK, R.A. Aspect of designtool for springback compensation. *Twente, INPRO, 2004. University of Twente*.
- [28] AUTOFORM ENGINEERING GMBH. AutoForm R5 – Streamlining Sheet Metal Forming. [online]. 2014 [cit. 2014-02-10]. Dostupné z: <http://www.autoform.com/en/news-events/news/autoform-plus-r5-streamlining-sheet-metal-forming/>
- [29] VRBKA, M. a VEVERKA, M.. *Metoda konečných prvků: Ansys*. Brno. Dostupné také z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [30] SOLFRONK, P. *Numerická podpora výroby výlisků z plechu*. Liberec, 2012. *Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci*.

- [31] BOERAEVE, P. Introduction To The Finite Element Method (FEM). *Institut Gramme – LIEGE*, 2010. Dostupné také z: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/MKP/prednaska1_mkp.pdf
- [32] FUKSA, M. a R. HALAMA. MKP a MHP - metoda konečných prvků a hraničních prvků [online]. Ostrava, 2011 [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecných_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf
- [33] BATHE, K. J. *Finite Element Procedures: Second Edition*. Watertown, 2016. ISBN 978-0-9790049-5-7.
- [34] WANG, E., et. Al., Back to Elements - Tetrahedra vs. Hexahedra. *CAD-FEM GmbH. Munich, Germany*. Dostupné také z: <http://www.designspace.com/staticassets/ANSYS/staticassets/resourcelibrary/confpaper/2004-Int-ANSYS-Conf-9.PDF>
- [35] DRASTÍK a kolektiv. *Strojnická příručka: vývoj, výpočty, konstrukce, technologie, výroba. [Svazek 1], Praha: Dashöfer, c2002-2009. ISBN 80-86229-65-3*
- [36] MATERIAL SPRINGBACK CALCULATOR: APPROXIMATE FORMULA. Empod Worldwide Corporation [online]. [cit. 2016-04-16]. Dostupné z: <http://www.empod.com/calculator.php>
- [37] LAJARIN, S. F., MARCONDES P. Influence of process and tool parameters on springback of high-strength steels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture [online]. 2014, 229(2), 295-305 [cit. 2017-08-01]. DOI: 10.1177/0954405414527954. ISSN 0954-4054.*
- [38] BURCHITZ, I. A. (2005). Springback, improvement of its predictability: Literature study report. (NIMR project MC1.02121). *Enschede: Netherlands Institute for Metals Research.*
- [39] LEU, Daw-Kwei a Zhi-Wei ZHUANG. Springback prediction of the vee bending process for high-strength steel sheets. *Journal of Mechanical Science and Technology. 2016, 30(3), 1077-1084. DOI: 10.1007/s12206-016-0212-8. ISSN 1738-494x.* <http://link.springer.com/10.1007/s12206-016-0212-8>
- [40] AUTOFORM ENGINEERING GMBH. *AutoForm R6 guide: Mesh accuracy. Switzerland, 2014. Dostupné z: http://www.autoform.com/en/*
- [41] VENKATACHALAM, G. et. al. Finite element analysis of springback effect on perforated sheet metal. *Indie, http://www.docfoc.com/fea-analysis-on-springback.*
- [42] DEPARTMENT OF FERROUS METALLURGY. *Springback of high strength automotive steels. Aachen. Dostupné z: http://www.iehk.rwth-aachen.de/index.php?id=503&L=2*
- [43] CHAPARRO, B.M., et al. Numerical simulation of the splitting ring benchmark test. *Universidade de Coimbra. 2001.*
- [44] CHANG, Sung Ho, et al. Springback characteristics of the tailor-welded strips in U-bending. *Journal of Materials Processing Technology. 2002. DOI: 130–131 (2002) 14–19.*
- [45] SONG, Yuntao, et al. *Spring-back Simulation of Sheet Metal Forming for the HT-7U Vacuum Vessel ring benchmark test. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences. 2006.*

- [46] THE UNIVERSITY OF AUCKLAND. *Solid Mechanics Part II: Engineering Solid Mechanics – small strain: Hardening*. Auckland. Dostupné také z: http://homepages.engineering.auckland.ac.nz/~pkel015/SolidMechanicsBooks/Part_II/08_Plasticity/08_Plasticity_06_Hardening.pdf
- [47] SCHAEFFLER, D. ENGINEERING QUALITY SOLUTIONS. Steel Formability Analysis Training. 2015, 2015. Dostupné z: <http://www.eqsgroup.com/index.asp>
- [48] OLIVEIRA, M.C., J.L. ALVES, and L.F. MENEZES. Springback evaluation using 3-d finite elements. In D.-Y. Yang, S.I. Oh, H. Huh, and Y.H. Kim, editors, *Proceedings of the 5th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Forming Processes, NUMISHEET 2002*, pages 189 – 194, Jeju Island, Korea, 2002.
- [49] M.J. FINN, P.C. GALBRAITH, L. WU, J.O. HALLQUIST, L. LUM, and T.-L. LIN. Use of a coupled explicit–implicit solver for calculating spring-back in automotive body panels. *Journal of Materials Processing Technology*, 50(1-4):395–409, 1995.
- [50] GAU, J.T., 1999. A study of the influence of the Bauschinger effect on the springback in the two-dimensional sheet metal forming. Doctoral Thesis. Ohio State University.
- [51] MORI K., AKITA K., ABE Y., Springback behaviour in bending of ultra-high-strength steel sheet using CNC servo press, *Int. J. Mach. Tool Manufac.*, 47 (2007) 321.
- [52] CHIRITA B., *Factors of influence on the springback of formed metal sheets*, ESAFORM The 5th International Conference on Material Forming, Krakow, Poland, 2002.
- [53] LIU G., et. al., *Variable blankholder force in ushaped part forming for eliminating springback error*, *J. of Mat. Proc. Tech.*, vol. 120, 2002

Seznam publikací autora dizertační práce

Publikace přímo související s tématem dizertační práce

- [P1] PAČÁK, T., et al. The Analysis and Elimination of Springback in Stamping Using Numerical Simulations. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 102-106. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P2] PAČÁK, T., TATÍČEK, F., a CHRÁŠŤANSKÝ, L. Analysis of the Springback Behavior under Various conditions with use of AutoForm SIGMA. In: KUDLÁČEK, J., ed. Technological forum 2016. Technological forum 2016. Červenohorské sedlo, 28.06.2016 - 30.06.2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2016, ISBN 978-80-87583-17-3.
- [P3] CVEŠPER, D., et al. Verification of Determining the Plastic Strain Ratio and Tensile Strain Hardening Exponent. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 22-26. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P4] VALEŠ, M., PAČÁK, T., a TATÍČEK, F. Problems in Manufacturing of Car Body Panels with Use of HSS. In: KUDLÁČEK, J., PAKOSTA, M., a ČERVENÝ, J., eds. Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 166-171. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [P5] VALEŠ, M., PAČÁK, T., a TATÍČEK, F. Feasibility Study of Manufacturing Outer Car Body Parts with Use of DP500. In: METAL 2017 Conference Proceedings. METAL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 24.05.2017 - 26.05.2017. Ostrava: Tanger Ltd.. 2018, s. 561-566. 1st Edition. ISBN 978-80-87294-79-6.
- [P6] PAČÁK, T., TATÍČEK, F., a CHRÁŠŤANSKÝ, L. Verification of Springback Analysis Accuracy in Deep Drawing Process with Focus on Initial Setting of Numerical Simulation. In: Metal 2016: 25th International Conference on Metallurgy and Materials. 25th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 25.05.2016 - 27.05.2016. Ostrava: Tanger. 2016, s. 464-469. ISBN 978-80-87294-67-3.
- [P7] PAČÁK, T., VALEŠ, M., a TATÍČEK, F. Methodology of the Springback Compensation in Sheet Metal Stamping Processes. In: METAL 2017 Conference Proceedings. METAL 2017 - 26th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 24.05.2017 - 26.05.2017. Ostrava: Tanger Ltd.. 2018, s. 502-507. 1st Edition. ISBN 978-80-87294-79-6.

- [P8] PAČÁK, T., KUBELKA, M., a VALEŠ, M. The Methodology and its Determination of the Springback in Stamping Processes of Outer Car Body Parts. In: KUDLÁČEK, J., PAKOSTA, M., a ČERVENÝ, J., eds. Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017. Technological forum 2017. Špindlerův Mlýn, 27.06.2017 - 29.06.2017. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2017, s. 192-197. ISBN 978-80-87583-22-7.
- [P9] PAČÁK, T., et al. The Methodology and Determination of the Springback in Large Metal Stamping. In: BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, s. 97-101. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P10] PAČÁK, T., et al. The Methodology for Determining the Springback of Large Metal Stampings [online]. In: Key Engineering Materials. 9th International Conference on Local mechanical Properties. Levoča, 07.11.2012 - 09.11.2012. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD. 2014, s. 151-156. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03785-876-9.
- [P11] PAČÁK, T. a M. VALEŠ. Metodika kompenzace odpružení u velkoplošných karosářských výlisků. MM Průmyslové spektrum. 2018, 02/2018, str. 34, počet stran 2.

Ostatní publikace autora dizertační práce

- [P12] CHRÁŠŤANSKÝ, L., et al. Methodology for mechanical joining of sheets for designing the hemmed joints. In: Metal 2016: 25th International Conference on Metallurgy and Materials. 25th International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 25.05.2016 - 27.05.2016. Ostrava: Tanger. 2016, s. 345-349. ISBN 978-80-87294-67-3.
- [P13] BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P14] MACHEK, V., et al. The Surface Quality of Hot-rolled Steel Sheets and Wide Steel. In: BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, s. 220-225. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P15] CHRÁŠŤANSKÝ, L., et al. The Methods of Fixation and Stabilization of Hemmed Joints for Panel Parts of Car Body Parts. In: BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, s. 57-60. ISBN 978-80-87583-13-5.

- [P16] PILVOUSEK, T., et al. Laser Scanning Technology in Numerical Simulations of Deep Drawing Processes. In: BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, s. 102-107. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P17] TURZA, L., GEBHART, M., a PAČÁK, T. CONFORMITY ASSESSMENT AND ITS RISKS. In: BENEŠOVÁ, D., et al., eds. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Technological forum 2015, 6th International Technical Conference. Kouty, 23.06.2015 - 25.06.2015. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2015, s. 139-142. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P18] TATÍČEK, F. a PAČÁK, T. Analýza mechanických vlastností materiálu P92 zkouškou tahem při různých podmínkách. Nad Kamínkou 1345, Praha: UJP Praha a.s.. 2014, U12133/2013/031.
- [P19] TATÍČEK, F., PAČÁK, T., a KUBELKA, M. Přehled technologií pro dělení materiálu v zápuštěkových kovárnách. Kovářství. 2014, 0(49), s. 37-40. ISSN 1213-9289.
- [P20] KUBELKA, M., et al. The Verification of Experimental Equipment for Forming. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 81-85. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P21] CHRÁŠŤANSKÝ, L., et al. The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 60-65. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P22] CVEŠPER, D., et al. Verification of Determining the Plastic Strain Ratio and Tensile Strain Hardening Exponent. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 22-26. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P23] TATÍČEK, F., PAČÁK, T., a KUBELKA, M. The Analysis of Shear Test on the Test Specimen. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2014. 5th International Technical Conference Technological Forum 2014. Kouty, 17.06.2014 - 19.06.2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček. 2014, s. 107-112. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P24] KUBELKA, M., et al. The Analysis of Pressed Parts Deformation on Small Radii. In: DIFFERENT AUTHORS, ..., ed. METAL 2014 Conference Proceedings. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 21.05.2014 - 23.05.2014. Ostrava: Tanger. 2014, s. 111. ISBN 978-80-87294-52-9.

- [P25] KUBELKA, M., et al. The Analysis of Pressed Parts Deformation on Small Radii. In: DIFFERENT AUTHORS, ..., ed. METAL 2014 Conference Proceedings. 23rd International Conference on Metallurgy and Materials. Brno, 21.05.2014 - 23.05.2014. Ostrava: TANGER. 2014, ISBN 978-80-87294-52-9.
- [P26] KUBELKA, M., et al. The Verification of Size Deformations on Small Radii. In: CAR, Z., KUDLÁČEK, J., a GALVAO, J.R., eds. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. International Conference on Innovative Technologies 2014. Leiria, 10.09.2014 - 12.09.2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka. 2014, s. 341-344. ISSN 1849-0662. Dostupné z: http://in-tech.info/download/proc_intech_2014_issn.pdf
- [P27] KUBELKA, M., et al. The Methodology Determining the Size of the Shear Stress on the Specific Samples. In: CAR, Z., KUDLÁČEK, J., a GALVAO, J.R., eds. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. International Conference on Innovative Technologies 2014. Leiria, 10.09.2014 - 12.09.2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka. 2014, s. 369-372. ISSN 1849-0662. Dostupné z: http://in-tech.info/download/proc_intech_2014_issn.pdf
- [P28] CHRÁŠŤANSKÝ, L., et al. The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints. In: CAR, Z., KUDLÁČEK, J., a GALVAO, J.R., eds. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. International Conference on Innovative Technologies 2014. Leiria, 10.09.2014 - 12.09.2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka. 2014, s. 373-376. ISSN 1849-0662. Dostupné z: http://in-tech.info/download/proc_intech_2014_issn.pdf
- [P29] KUBELKA, M., PAČÁK, T., a TATÍČEK, F. The Methodic of Testing Using Experimental Equipment [online]. In: Key Engineering Materials. 9th International Conference on Local mechanical Properties. Levoča, 07.11.2012 - 09.11.2012. Zurich: TRANS TECH PUBLICATIONS LTD. 2014, s. 94-99. ISSN 1013-9826. ISBN 978-3-03785-876-9.
- [P30] TATÍČEK, F., KUBELKA, M., a PAČÁK, T. Materiál pro podmínky vysokoteplotní degradace. Karlštejn č.p. 261, 267 18 Karlštejn: Kerval, a.s.. 2014
- [P31] PAČÁK, T., TATÍČEK, F., a TURZA, L. Monitoring the behaviour of the material at various strain rates. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2013. Technologické fórum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing.. 2013, s. 64-68. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [P32] TATÍČEK, F., et al. The influence of strain rate on the properties of deep drawing steels. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2013. Technologické fórum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing.. 2013, s. 118-122. ISBN 978-80-87583-06-7.

- [P33] VOJKOVSKÝ, K., TURZA, L., a PAČÁK, T. Sheet hydroforming in automotive applications. In: KUDLÁČEK, J., et al., eds. Technological Forum 2013. Technologické fórum 2013. Kouty, 25.06.2013 - 27.06.2013. Jaroměř: Kudláček Jan, Ing.. 2013, s. 139-146. ISBN 978-80-87583-06-7.
- [P34] TATÍČEK, F., et al. Analýza SW pro simulaci tepelného zpracování. Nad Kamínkou 1345, Praha: UJP Praha a.s.. 2013, U12133/2013/036.
- [P35] TATÍČEK, F., PAČÁK, T., a MACHEK, V. Analýza smykového napětí ve vzorku. Nad Kamínkou 1345, Praha: UJP Praha a.s.. 2013, U12133/2013/030.
- [P36] TATÍČEK, F., KUBELKA, M., a PAČÁK, T. Příprava vzorků pro ověřování mechanických vlastností svarových částí. Nad Kamínkou 1345, Praha: UJP Praha a.s.. 2013, U12133/2013/033.
- [P37] TATÍČEK, F., KUBELKA, M., a PAČÁK, T. Analýza problémů s deformacemi odlučovací elektrody. Milevsko, Sažinova 888: ZVVZ MACHINERY, a.s.. 2013, U12133/2013/034.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 2.1 – Zobrazení konvenčního lisovací nářadí vlevo v horní úvrati (OTL) a vpravo ve spodní úvrati (UTL).	14
Obrázek 2.2 – Schéma kinematiky mechanické lisovací linky PXL se servopohonem.	15
Obrázek 2.3 – Odpružení dílu A sloupku Daimler v porovnání s referenční geometrií. [8]	15
Obrázek 2.4 – Schéma procesu návrhu a výroby lisovacího nářadí s ohledem na odpružení výlisku.	17
Obrázek 2.5 – Ukázka principu kompenzace odpružení s využitím bombírované plochy, podobně jako v případě jednoduchého ohybu.	18
Obrázek 2.6 – Princip vzniku odpružení při jednoduchém ohybu. [11]	20
Obrázek 2.7 – Schéma odpružení v případě jednoduchého ohybu, a) vstupní plechový materiál o tloušťce t , b) ohyb materiálu do poloměru R , odpružení materiálu do poloměru r , c) změna poloměru ohybu po odpružení. [12]	21
Obrázek 2.8 – Schéma experimentu pro porovnání přístupů k problematice odpružení. [12].....	26
Obrázek 2.9 – Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení v závislosti odpružení na poměru R/t . [12]	26
Obrázek 2.10 – Porovnání jednotlivých přístupů k problematice odpružení v závislosti poměrného odpružení r/R na poměru R/t . [12]	27
Obrázek 2.11 – Závislost poměru R/t na velikosti odpružení u zastudena válcované nízkouhlíkové oceli. [15]	29
Obrázek 2.12 – Porovnání vlivu použitého materiálu a jeho mechanických vlastností na velikost odpružení v ohybu. [16]	30
Obrázek 2.13 – Zpřesnění popisu deformačního zpevnění u kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [19]	31
Obrázek 2.14 – Schéma izotropního zpevnění materiálu. [18].....	31
Obrázek 2.15 – Schéma kinematického zpevnění materiálu. [18].....	32
Obrázek 2.16 – Schéma kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [18]	32
Obrázek 2.17 – Změna charakteru odpružení v závislosti na lisovacích operacích (Díl blatníku ŠKODA Superb III).	33
Obrázek 2.18 – Porovnání vlivu technologických podmínek na velikost odpružení. [11]	34
Obrázek 2.19 – Ukázka zpevňujících prolisů ke zlepšení tuhosti dílu na blatníku vozu ŠKODA Superb.	37
Obrázek 2.20 – Aplikace modulu Compensator z důvodu snížení odpružení u B sloupku. [25]	38
Obrázek 3.1 – Analýza numerické simulace lisovacího procesu vnitřní kapoty automobilu. [28].....	41
Obrázek 3.2 – Souvislosti fyzikálního a matematického modelování s fyzikálním experimentem. [30]	43
Obrázek 3.3 – Příklady nepoužívanějších typů elementů pro řešení různých problémů. [31]	44
Obrázek 3.4 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [32].....	44
Obrázek 3.5 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [32].....	45
Obrázek 3.6 – Ukázka automatické modifikace adaptivní sítě v oblasti výztužného prolisu.	45
Obrázek 3.7 – Grafické vysvětlení posunu v závislosti na napětí v membránovém elementu. [33]	46
Obrázek 3.8 – Tří uzlový trojúhelníkový element typu membrány. [33]	47
Obrázek 3.9 – Zakřivený skořepinový (shell) element. [33]	47
Obrázek 3.10 – rozdíl v zasíťování mezi tetrahedra quadratickým a hexahedra quadratickým elementem, sekvence a) až f) vyjadřují výšku úvratě kovadel. [34]	48
Obrázek 5.1 – Sled lisovacích operací dílu vnějších pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P11].....	51
Obrázek 5.2 – Sled lisovacích operací dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P11].....	52
Obrázek 5.3 – Sled lisovacích operací dílu vnějšího blatníku vozu ŠKODA Superb. [P11].....	52
Obrázek 6.1 – Nastavení kinematiky lisovacích nástrojů tažné operace U profilu. [P10].....	54
Obrázek 6.2 – Analýza vlivu přídržovací síly na velikost odpružení ($F_b = 300$ kN až 470 kN). [P10]	55
Obrázek 6.3 – Analýza vlivu přídržovací síly na velikost odpružení ($F_b = 300$ kN až 470 kN). [P10]	56
Obrázek 6.4 – Porovnání tahových diagramů různých typů materiálu. [35]	57
Obrázek 6.5 – Porovnání křivky deformačního zpevnění vybraných materiálů. [P1].....	59
Obrázek 6.6 – Analýza odpružení u vybraných materiálů při jednoduchém ohybu s R_2 . [P1].....	60

Obrázek 6.7 – Analýza odpružení u vybraných materiálů při jednoduchém ohybu s R10. [P1].....	60
Obrázek 6.8 – Porovnání velikosti odpružení pro jednotlivé poloměry ohybu na vybraných materiálech (HX180BD-Z a DC06). [P1].....	61
Obrázek 6.9 – Porovnání výsledků experimentu pro materiál HX180BD Z spolu s hodnotami zjištěnými pomocí kalkulátoru odpružení. [P1].....	62
Obrázek 6.10 – Porovnání výsledků experimentu pro materiál DC06 spolu s hodnotami zjištěnými pomocí kalkulátoru odpružení. [P1].....	62
Obrázek 6.11 – Příklad nastavení metody výpočtu numerické simulace s vlivem na tažný poloměr hrany. [40].....	66
Obrázek 6.12 – Technický díl, geometrie konečných výlisků, a) Spodní páte dveře SEAT Ateca, b) Blatník ŠKODA Superb. [P6].....	67
Obrázek 6.13 – Porovnání konečné sítě brzdící drážky pátých dveří vozu SEAT Ateca u metod a) CE a b) FV. [P6].....	68
Obrázek 6.14 – Sken odpruženého výlisku vnějších spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca ze skutečného lisovacího procesu. [P6].....	69
Obrázek 6.15 – Ukázka lokálních nerovností na naskenované ploše dílu HKau vozu SEAT Ateca. [P6].....	69
Obrázek 6.16 – Analýza odpružení jednotlivých metod nastavení sítě numerické simulace. Černé a zelené body označují kontrolní RPS body, ve kterých byla měřena hodnota normálového odpružení. [P6].....	70
Obrázek 6.17 – Graf porovnání analýzy odpružení jednotlivých metod nastavení sítě numerické simulace. [P6].....	71
Obrázek 6.18 – Porovnání metody zasiťování modelu a) CE a b) FV z pohledu kvality numerické simulace. [P6].....	72
Obrázek 6.19 – Porovnání použité geometrie lisovacího nářadí (zobrazeny nástroje ze střížné operace OP40) v numerické simulaci a) Neodlehčená geometrie a b) Odlehčená geometrie podle reálného lisovacího procesu (na levé straně řezu nástrojem zobrazen plech sevřený spodní a vrchní částí nástroje, na pravé straně řezu nástrojem je zobrazena jen spodní část nástroje). [P8].....	74
Obrázek 6.20 – Grafické porovnání naměřených hodnot velikosti odpružení analýzy numerické simulace v závislosti na použité geometrii nářadí. [P8].....	75
Obrázek 7.1 – Příklad měrového protokolu pro díl blatníku. Měřeno skenovacím systémem ATOS Triplexscan 700. [P9].....	76
Obrázek 7.2 – Příklad upnutí dílu HKau do upínacího přípravku při reálném měření na souřadnicovém měřicím stroji. [P8].....	77
Obrázek 7.3 – Ukázka možné strategie pro vhodné upnutí dílu pro následnou analýzu odpružení na díle HKau SEAT Ateca. [P8].....	78
Obrázek 7.4 – Sken výlisku spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca (označený zelenou barvou) na zvedačích po tažné operaci (zobrazený v izometrickém pohledu a ve směru osy y). [P9].....	81
Obrázek 7.5 – Ukázka polohy dílu v absolutní poloze na voze. Díl HKau vozu SEAT Ateca zvýrazněn zelenou barvou.	82
Obrázek 7.6 – Porovnání dvou různých poloh při analýze odpružení (a) poloha WZL - poslední lisovací operace, b) poloha FZL - totožná s dílem na vozu) [P9].....	83
Obrázek 7.7 – Sken nástroje bez uloženého výlisku. Podle barvy: červená – zvedač, modrá – nástavek, šedivá – přidržovací systém, hnědá – vložky.	84
Obrázek 7.8 – Sken výlisku spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca (označený zelenou barvou) na zvedačích po tažné operaci (zobrazený v izometrickém pohledu a ve směru osy y). [P7].....	84
Obrázek 7.9 – Analýza odpružení v normálovém směru na díle spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca se zaměřením na analýzu gravitace při porovnání skenu reálného výlisku a numerické simulace. (a) Díl z numerické simulace, b) Sken zobrazený v SW Catia, c) Porovnání skenu a num. simulace). [P7].....	85
Obrázek 7.10 – Navržená diskretní škála pro zobrazení analýzy odpružení. [P6].....	89
Obrázek 7.11 – Navržená kontinuální škála pro zobrazení analýzy odpružení. [P6].....	89
Obrázek 7.12 – Schéma metodiky pro přesnou virtuální analýzu odpružení s využitím numerické simulace. [P7].....	91
Obrázek 8.1 – Nastavení výpočtového modulu AutoForm Sigma pro analýzu okrajových podmínek a jejich návaznost na velikost odpružení. [P2].....	93

Obrázek 8.2 – Porovnání analýzy odpružení v normálovém směru: b) Nominální nastavení, b) optimalizace pomocí výpočtového modulu SIGMA. [P2].....	94
Obrázek 8.3 – Mapová analýza vylisku HKau z pohledu vlivu okrajových podmínek na velikost odpružení. [P2].....	95
Obrázek 8.4 – Porovnání vlivu jednotlivých parametrů na velikost odpružení v krajní oblasti vylisku. [P2]...96	
Obrázek 8.5 – Porovnání vlivu jednotlivých parametrů na velikost odpružení ve středové oblasti vylisku. [P2]	97
Obrázek 8.6 – Vliv okrajových podmínek na velikost odpružení. Hodnoty získané z analýzy vnějšího dílu pátých dveří vozu SEAT Ateca. [P2]	98
Obrázek 8.7 – Část vyplněného kontrolního listu, který slouží jako nástroj pro návrh a zpětné vyhodnocení numerické simulace. [P7]	100
Obrázek 9.1 – 1. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie pouze v tažné operaci. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7]	102
Obrázek 9.2 – 2. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie v tažné a následně kalibrovací operaci. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7].....	103
Obrázek 9.3 – 3. Strategie kompenzace odpružení s kompenzací geometrie ve všech lisovacích operacích, včetně střížných. Černá šipka určuje, která operace je do kompenzace odpružení zahrnuta a na základě jaké operace je kompenzace provedena. [P7]	104
Obrázek 9.4 – Navržený model dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca (HKau).	106
Obrázek 9.5 – Analýza tvařitelnosti lisovacího procesu spodních pátých vnějších dveří vozu SEAT Ateca (analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvařitelnost lisovacího procesu).	107
Obrázek 9.6 – Ověření přesnosti virtuální analýzy odpružení na základě porovnání naskenovaného vylisku ze skutečného lisovacího procesu s analýzou odpružení v rámci numerické simulace (vnější spodní páté dveře SEAT Ateca). [P7]	107
Obrázek 9.7 – Porovnání analýzy odpružení mezi a) upnutím dílu ve všech pozicích podle zadaných RPS bodů a b) upraveným upnutím dílu s použitím méně upínek. [P7].....	108
Obrázek 9.8 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (dílna spodních pátých dveří vozu SEAT Ateca). [P7].....	109
Obrázek 9.9 – Porovnání výsledků provedených strategií kompenzace odpružení dílu HKau SEAT Ateca. [P7].....	110
Obrázek 9.10 – Grafické zobrazení finální kompenzační strategie s třemi iteračními smyčkami. [P7].....	111
Obrázek 9.11 – Analýza odpružení na základě vstupní numerické simulace do kompenzace odpružení. [P7]	112
Obrázek 9.12 – Analýza odpružení po první iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7].....	112
Obrázek 9.13 – Analýza odpružení po druhé iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7].....	112
Obrázek 9.14 – Analýza odpružení po třetí iteraci kompenzace odpružení (kompenzační strategie – viz tabulka 13). [P7].....	113
Obrázek 9.15 – Porovnání spojitého a nespojitého průběhu ploch nástroje v řezu, a) navržená geometrie nástroje, b) rozbitá - kompenzovaná geometrie nástroje (možné kontrolovat faktorem vyhlazení). [P8]	114
Obrázek 9.16 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]	114
Obrázek 9.17 – Grafické porovnání původní geometrie lisovacích nástrojů v jednotlivých operacích a výsledné změny kompenzované geometrie nástrojů. [P7].....	115
Obrázek 9.18 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci ve směru osy X). [P7].....	116
Obrázek 9.19 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci ve směru Y_1 a Y_2). [P7].....	117
Obrázek 9.20 – Geometrie TM dílu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca	118
Obrázek 9.21 – Analýza tvařitelnosti lisovacího procesu vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca (analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvařitelnost lisovacího procesu).	119

Obrázek 9.22 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (díl vnitřních pátých dveří vozu SEAT Ateca). [P11]	120
Obrázek 9.23 – Porovnání analýzy odpružení mezi naskenovaným dílem ze skutečného lisovacího procesu (a) a numerickou simulací (b). [P11]	121
Obrázek 9.24 – Grafické zobrazení finální aplikované kompenzační strategie.	121
Obrázek 9.25 – Analýza odpružení v jednotlivých iteracích kompenzace, a) analýza odpružení vstupní nekompenzované numerické simulace, b) analýza odpružení po první iteraci kompenzace. [P11]	122
Obrázek 9.26 – Analýza odpružení v následných iteracích kompenzace odpružení (c) druhá iterace kompenzace, d) třetí iterace kompenzace). [P11].....	123
Obrázek 9.27 – Porovnání analýzy odpružení mezi naskenovaným dílem z lisovacího procesu (a) a numerickou simulací (b). [P7]	124
Obrázek 9.28 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]	125
Obrázek 9.29 – Porovnání průběhu kompenzované geometrie s původním tvarem nástroje (vyhodnocováno na ploše matrice v tažné operaci). [P7]	126
Obrázek 9.30 – Geometrie TM dílu blatníku vozu ŠKODA Superb.	127
Obrázek 9.31 – Analýza tvařitelnosti lisovacího procesu dílu blatníku vozu ŠKODA Superb (analýza zelenou barvou označuje zaručenou tvařitelnost lisovacího procesu).....	128
Obrázek 9.32 – Ověření přesnosti virtuální analýzy odpružení na základě porovnání naskenovaného výlisku ze skutečného lisovacího procesu s virtuální analýzou odpružení (blatník vozu ŠKODA Superb). [P7].....	129
Obrázek 9.33 – Analýza velikosti odpružení na základě vypočtené numerické simulace s nastavením dle navržených standardů a doporučení (díl blatníku vozu ŠKODA Superb). [P7]	130
Obrázek 9.34 – Grafické zobrazení finální aplikované kompenzační strategie.	131
Obrázek 9.35 – Analýza odpružení v jednotlivých iteracích kompenzace, a) analýza odpružení vstupní nekompenzované numerické simulace, b) analýza odpružení po první iteraci kompenzace odpružení. [P7]	132
Obrázek 9.36 – Analýza odpružení v následných iteracích kompenzace, a) analýza odpružení po druhé iteraci kompenzace odpružení, b) analýza odpružení po třetí iteraci kompenzace odpružení. [P7]	133
Obrázek 9.37 – Porovnání vstupní geometrie lisovacího nástroje pro tažnou operaci a konečné kompenzované geometrie tažného nástroje. [P7]	134
Obrázek 9.38 – Schéma účinnosti virtuálního řešení kompenzace odpružení v závislosti na třídě složitosti dílu (Legenda statusu – zelená = modifikované řešení je možné využít v praxi, žlutá = modifikované řešení je možné využít v praxi s výhradami a možnými komplikacemi, červená = modifikované řešení v současné době nelze využít v praxi). [P11]	136
Obrázek 9.39 – Schéma současného přístupu k problematice odpružení v praxi.	139
Obrázek 9.40 – Schéma modifikovaného řešení přístupu k problematice odpružení s využitím navržené metodiky.....	139

Seznam použitých tabulek

<i>Tabulka 1 – Porovnání metod nastavení zasiťování v numerické simulaci [P6]</i>	66
<i>Tabulka 2 – Porovnání výsledků experimentu jednotlivých metod [P6]</i>	67
<i>Tabulka 3 – Normálová hodnota odpružení vzhledem k referenční geometrii měřená v kontrolních RPS bodech: [P6]</i>	71
<i>Tabulka 4 – Porovnání přesnosti predikce odpružení v závislosti na použité geometrii lisovacích nástrojů: [P7]</i>	74
<i>Tabulka 5 – Normálové odpružení vzhledem k referenční geometrii měřená v RPS bodech: [P8]</i>	85
<i>Tabulka 6 – Nastavení parametrů výpočetní sítě ve standardu. [P6]</i>	87
<i>Tabulka 7 – parametry lisovacího procesu upravené navrženým standardem. [P6]</i>	88
<i>Tabulka 8 – popis metodiky analýzy odpružení. [P6]</i>	90
<i>Tabulka 9 – Sledované okrajové podmínky v numerické simulaci a jejich rozhraní [P2]</i>	93
<i>Tabulka 10 – Hodnoty optimálního nastavení vstupních parametrů numerické simulace s ohledem na odpružení [P2]</i>	94
<i>Tabulka 11 – Obecné doporučení pro nastavení numerické simulace lisovacího procesu s cílem snížení odpružení materiálu [P2]</i>	99
<i>Tabulka 12 – Přehled nastavení numerické simulace lisovacího procesu pro díl HKau [P2]</i>	106
<i>Tabulka 13 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu: [P2]</i>	111
<i>Tabulka 14 – Přehled nastavení lisovacího procesu pro díl HKi</i>	119
<i>Tabulka 15 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu:</i>	122
<i>Tabulka 16 – Přehled nastavení lisovacího procesu pro díl blatníku vozu ŠKODA Superb</i>	128
<i>Tabulka 17 – Popis parametrů nejvhodnější strategie pro kompenzaci dílu:</i>	131
<i>Tabulka 18 – porovnání současného přístupu k problematice odpružení s nově navrženou metodikou s využitím virtuální kompenzace odpružení</i>	137

Příloha č. 1 – Ukázka vyplněného kontrolního listu numerické simulace na díl Hkau SEAT Ateca

Kontrolní list simulace tváření

Projekt: ŠKODA Superb	Číslo dílu / Teil-Nr.: 11.22.33	Název dílu / Teilbenennung: Heckklappe A.U.
Číslo metodického plánu / Methodenplan-Nr.:	TM data / TM Daten:	TZ výkres / TZ Zeichnung:

Pre Processing:

Import dat

Informace o materiálu

Požadovaný materiál:	DC06
Požadovaná tloušťka materiálu:	0.7

Import dat

1 Tolerance & nastavení:

1.1	- Meshing Tolerance [dle normy VW01170] interní norma	0.05 mm	
1.2	- Stitching distance [dle normy VW01170] interní norma	0.5 mm	
1.3	- Max Side Length [dle normy VW01170] interní norma	30 mm	
1.4	- Poměr rádius / tloušťka plechu [R/t < 2]	<input checked="" type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano
1.5	- Zasiřování (Mesh) v pořádku pro nástroj a plech?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	
1.6	- Pro vyhodnocení jsou použity standardy "Standard Evaluation"?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
1.7	Typ symetrie - Je geometrie dílu plně symetrická? (např. tažení dvojčat)	<input checked="" type="radio"/> Ano	
1.8	- Je definována symetrie jako plný import + pomocná symetrie?	<input type="radio"/> Ne	<input checked="" type="radio"/> Ano *pro definici sym. listů
1.9	Import CAD geometrie:		
1.10	- Data importována na základě aktuálního stavu (MK, MP, NCM)?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
1.11	- Použita nominální geometrie [*bez žádné kompenzace či bombírování]?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
1.12	- Všechny data importována v souřadnicích vozu?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
1.13	- Importovány vlastní geometrie pro jednotlivé operace (jen pro jednu OP)?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne *nutné pro kompenzaci
1.14	- Importována jedna geometrie pro celou tahovou OP (master geometry)?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne *nutné pro kompenzaci
1.15	- Správná orientace geometrie [při pohledu shora viditelná lesklá barva]?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.

Definování materiálu

2 Materiálová data:

2.I	- Materiál odpovídá požadovanému materiálu daného projektu?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
2.II	- Materiálová data získána od?	<input type="radio"/> VW Konzern	<input type="radio"/> AF <input checked="" type="radio"/> Dodavatel mat.
2.III	Materiálová data příslušného rozmezí tloušťky?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne (např. pro t = 0,65 použít mat. 0,6 - 0,8 mm)
2.IV	Jsou použity svařované plechy? (Tailored blanks)	<input checked="" type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano <input type="checkbox"/> O.K.

Plán procesu

Metodický plán

3 Nastavení metodického plánu:

3.I	- Způsob tažení odpovídá produkční (náhradní) lisovací lince?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
3.II	- Nastavení s mezioperačním měřením rozpružení?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne *nutné pro kompenzaci
3.III	- Byl pro definici OP v numerické simulaci využit "Process plan"?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne *doporučeno pro komp.
3.IV	Nastavení simulace provedeno s ohledem na následnou simulaci lemování?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne

Nástřih plechu

Definice nástřihu plechu

4 Definována Symetrie?

4	Definována Symetrie?	<input type="radio"/> Ne	<input checked="" type="radio"/> Ano
4.I	- jak byla symetrie definována?	<input type="radio"/> Bez Symetrie	<input type="radio"/> Levá/Pravá
		<input checked="" type="radio"/> Plný (full)	
4.II	Křivka nástřihu plechu importována z aktuálního MP?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
4.III	Směr válcování je nastaven dle požadavků?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
4.IV	- Šířka svítka plechu v simulaci je zaokrouhlená na 5 mm?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne

5 Využití materiálu

5.I	Využití materiálu u nástřihu zohledněno?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	
5.II	- Redukce hloubky tahu z důvodu ekonomického využití materiálu?	<input checked="" type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano <input type="checkbox"/> přijatelné
5.III	- Lze spotřebu mat. minimalizovat tažením s otevřenou hlavou nástroje?	<input type="radio"/> Ne	<input checked="" type="radio"/> Ano
5.IV	- Tahový model / Tažení s otevřenou hlavou?	<input checked="" type="radio"/> zavřené	<input type="radio"/> otevřené *požadováno jasné vyjádření

Definice procesu			
PL			
6 Nastavení (Settings)			
6.I	Geometrie nástroje odpovídá:	Horní (Upper Side) <input type="checkbox"/> O.K.	
		Dolní (Lower Side) <input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
7 Mazání (Lube)			
7.I	Parametr mazání (Lube):	0.15	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.
Plán lisovacích operací			
8	Odpovídá nastavení simulace funkcí nástrojů?	OP20	OP30 OP40
8.1	- Stříhání s nástroji (Cutting with tools)	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
8.2	- Gravitace a lokace (Gravity / Locating)	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
8.3	- Eliminace smrštění (Scaling of Tools)	<input checked="" type="checkbox"/> Ne <input type="checkbox"/> Ano	<input type="checkbox"/> Ne <input type="checkbox"/> Ano
8.4	- Free Springback jako samostatná operace	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
9	Odpovídá nastavení simulace funkcí nástrojů?	OP50	OP60 OP70
9.1	- Stříhání s nástroji (Cutting with tools)	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
9.2	- Gravitace a lokace (Gravity / Locating)	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
9.3	- Free Springback jako samostatná operace	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne
Tažná operace OP20			
10 Nástroje (Tools)			
10.1	- Kinematika nástrojů:	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
10.2	- Zrychlení přidržovače (pre-acceleration)	<input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	
10.3	- Podepření nástřihu tažníkem	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
10.4	- Síly odpovídají konstrukci nástroje?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
10.5	- Síly odpovídají parametrům lisu?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
10.6	- Tuhost nástrojů dle normy VW01170? (10, 30, či 50 Mpa/mm)?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
10.7	- Sevření nástrojů nastaveno jako?	<input type="checkbox"/> Gap Cont. <input type="checkbox"/> Spring Cont. <input checked="" type="checkbox"/> Force Cont.	
10.8	- Oblasti slícování (partial bearing)?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
11 Brzdicí drážky (Drawbeads)			
11.I	Drawbeads / Drawsteps	<input checked="" type="checkbox"/> Tvar líšty odpovídá normě 39V1250?	
11.II	- Typ brzdící drážky:	<input type="checkbox"/> Constant Line Bead <input checked="" type="checkbox"/> Adaptive Line Bead <input type="checkbox"/> 3D Profile <input type="checkbox"/> Flattening: Profile, Adaptive <input type="checkbox"/> Flattening: Imported, Constant <input type="checkbox"/> Flattening: Imported, Adaptive	<input type="checkbox"/> Unflattening
11.III	- Přechod mezi brzdícími faktory min 40 mm?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
11.IV	- "Uplift forces" < přidržovací síla?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
11.V	- Křivka brzdící drážky je vyhlazená? (curved smooth)	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
11.VI	- Vzdálenost křivky (osy líšty) od hranice matričního rádia dle 39V1250?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	<input type="checkbox"/> přijatelné
12 Piloty (Pilots/Spacers Page)			
12.I	- Jsou použity piloty v tažné operaci?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
12.II	- Je správně definovaná poloha pilotů?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
12.III	- Průměr pilotů definován dle požadavků? Cca 20 mm	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
Následné strážné a kalibrovací operace			
13 Nástroje (Tools)			
13.I	- Kinematika nástrojů:	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
13.II	- Zrychlení přidržovače (pre-acceleration)	<input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	
13.III	- Podepření nástřihu tažníkem	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
13.IV	- Přidržovací síly odpovídají konstrukci nástroje?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
13.V	- Síly odpovídají parametrům lisu?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
13.VI	- Tuhost nástrojů dle normy VW01170? (10, 30, či 50 Mpa/mm)?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
13.VII	- Sevření nástrojů	<input type="checkbox"/> Gap Cont. <input type="checkbox"/> Spring Cont. <input checked="" type="checkbox"/> Force Cont.	
13.VIII	- Oblasti slícování (partial bearing)?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
14 Drawbeads			
14.I	Zohledněná brzdící drážka z předchozí operace?	<input checked="" type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
15 Piloty (Pilots/Spacers Page)			
15.I	- Jsou použity piloty v následných operacích??	<input type="checkbox"/> Ano <input checked="" type="checkbox"/> Ne	
15.II	- Je správně definovaná poloha pilotů?	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
15.III	- Průměr pilotů definován dle požadavků? Cca 20 mm	<input type="checkbox"/> Ano <input type="checkbox"/> Ne	
Konečná měřicí operace OP100			
16			
16.I	Je definována poloha RPS bodů?	Car Position	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.
16.I	- Metoda měření "Real Measurement" na min, popř. max počet bodů RPS?	Car Position	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.

Nastavení simulace			
Kontrolní panel			
17 Hlavní (Main / Misc)			
17.I	Je simulace počítána na nastavení dle normy VW11070? (interní norma)	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
Nastavení pro případnou následnou kompenzaci dat, či analýzu povrchových vad:			
	- V případě kompenzace dat je simulace počítána na FV?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
17.II	- V případě analýzy povrch. vad nastavení dle prezentace ze školení?*	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
17.III	Analýza lisovatelnosti - "Acceptable thinning = 0,25", "Required thinning = 0,03"	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
18 Výsledek (Output)			
18.I	Time steps / MaxMaterial Displacement = 2.2	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
18.II	Time steps / Advanced / End Tool Displacementstep = 0.4	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
18.III	Je aktivován restart na konci každé operace?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
19 Start			
19.I	Byla ověřena kinematika procesu?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne
Stránka zápisu (Log)			
20 Solver Warnings			
20.I	Solver Monitor	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
	- Dostatečný počet konvergencí (Iterations) pro výpočet?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
	- Konvergentní chování (Equilibrium iterations)?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
Analýza výsledků			
Hlavní			
21 D-20: Procesní stav			
21.I	Provedena kontrola kinematiky nástrojů?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
21.II	Distribuce tlaku na přídržovači:	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
	- Při sevření nástřihu přídržovačem	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
	- Na začátku procesu	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
	- Na konci procesu	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
22 Následné operace: Procesní stav			
22.I	Polohování dílu? (Part positioning / locating)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
22.II	Rychlost plastické deformace? (Plastic strain rate)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
23 Trhliny (Splints)			
23.I	Maximální porušení? (Max. Failure - FLC - bezpečná oblast) [-> "Upper Limit"]	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
23.II	0,8 > Max Failure > 0,7 v hlavních oblastech dílu [-> "Lower Limit"]	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
23.III	Ztenčení materiálu? (Thinning - critical areas)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
23.IV	Hlavní deformace na ploše výlisku? (Major strain)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
24 Zvlnění (Wrinkles)			
24.I	Viditelné zvlnění (Wrinkles):	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
	- Při sevření nástřihu přídržovačem	<input type="radio"/> O.K.	<input checked="" type="radio"/> není O.K.
	- Během procesu	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
	- Na konci procesu	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
24.II	Plošné vady (Surface defect height) v oblasti výlisku / v oblasti tažných ploch?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
24.III	Nadbytečný materiál v tažných oblastech (wrinkling)?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
25 Vtažení plechu (Draw-In)			
25.I	Vtažení plechu (Draw-In):	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
	- Vyjždí materiál z brzdících drážek?	<input type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano <input type="checkbox"/> přijatelné
	- Jsou přetahy brzdících drážek viditelné?	<input type="radio"/> Ne	<input type="radio"/> Ano <input type="checkbox"/> přijatelné
26 Přetahované hrany (Skid Lines)			
26.I	Přetahované hrany? (Skid impact lines)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
26.II	Zamezené jednostranné vtažení plechu? (one-sided draw-in)	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
27 Odpružení (Springback)			
27.I	Simulace vhodná pro kompenzaci? Analýza odpružení ve směru "Distance in Nor."	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne <input type="checkbox"/> přijatelné
28 Plochy (Surface)			
28.I	Plošné vady vzaty v potaz?	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne <input type="checkbox"/> přijatelné
29 Síly (Forces)			
29.I	Mohou být tvářecí síly realizovány v reálném procesu?	<input checked="" type="radio"/> O.K.	<input type="radio"/> není O.K.
30 Stabilita procesu (Robustness)			
30.I	Stabilita procesu (Robustness) zajištěna?	<input checked="" type="checkbox"/> O.K.	
	- Vyrobitelnosti	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne <input type="checkbox"/> přijatelné
	- Odpružení	<input checked="" type="radio"/> Ano	<input type="radio"/> Ne <input type="checkbox"/> přijatelné

Finální validace ověřena:		
Komentář:		
Vypracoval / Bearbeiter:	Schválil / Genehmigt:	Datum:
Ing. Tomáš Pačák	Ing. Tomáš Pačák	7.4.2018

DC06+ZE

Mild steel grades for cold forming

Material no.	1.0873
according to	DIN EN 10152, edition 08/03

Surface finishes

This steel grade is available with surface finishes A and B and 03 and 05 respectively: The mild and the isotropic steel grades can only be supplied by agreement with surface finish B and 05 respectively in widths >1.700 mm.

Chemical composition

(in percent by weight)

	min.	max.
C		0.02 %
P		0.020 %
S		0.020 %
Mn		0.25 %
Ti		0.3 % ¹⁾

¹⁾ Titanium can be replaced by niob. Carbon and nitrogen must be fixed completely.

Mechanical properties (transverse)

Yield strength $R_{eL}/R_{p0.2}$
130 - 180 MPa
Tensile strength R_m
270 - 350 MPa
Total elongation A_{90}
≥ 41 %
Hardening exponent n_{90}
≥ 0.21
Anisotropy r_{90}
≥ 2.1

The samples for the tensile test are taken at right angles to rolling direction unless the product width is opposed to this.

Available dimensions

Thickness in mm	Width in mm
0.50 - 0.59	900 - 1,585
0.60 - 0.69	900 - 1,685
0.70 - 3.00	900 - 1,850

Příloha č. 3 – Materiálový list DX57

Cold-rolled DX57-GI HyperForm®

Formable steel with superior deep drawing and stretching properties

DX57-GI HyperForm® is a hot-dip galvanised steel grade developed to meet the highest requirements on formability. With the combination of low initial strength, high n-value and r-value DX57-GI HyperForm provides an engineering solution for the most complex panels. Superior deep drawing and stretching properties makes this grade the best option for improving press shop efficiency and reducing total cost

of ownership (TCO). Typical applications are bodyside panels, door inner panels, wheel arches and floor panels with integrated spare wheel wells. DX57-GI HyperForm comes with a hot-dip galvanised coating in both unexposed and exposed surface quality and widths up to 1800 mm.

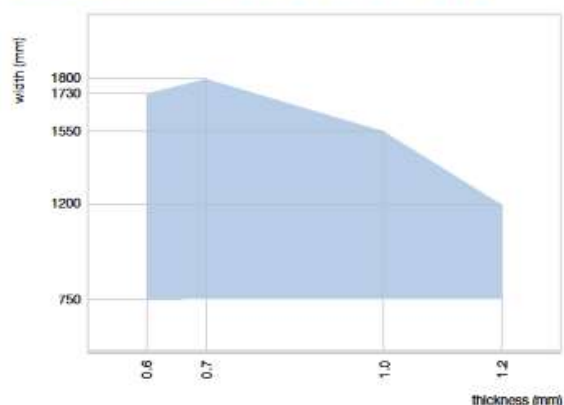
Mechanical properties

Grade	Test direction	Yield strength $R_{p0.2}$ (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_{10} (%)	n-value	r-value	$r_{average}$
DX57-GI HyperForm	T	120-160	260-310	≥ 43	≥ 0.23	≥ 2.3	≥ 2.0
DX57 (EN 10346)	T	120-170	260-350	≥ 41	≥ 0.22	≥ 2.1	-

Chemical composition

	C	Si	Mn	P	S	Al	Ti
	max.	max.	max.	max.	max.	min.	max.
DX57-GI HyperForm	0.01	0.50	0.70	0.020	0.020	0.010	0.20
DX57 (EN 10346)	0.12	0.50	0.60	0.10	0.045		0.30

Available dimensions for DX57-GI HyperForm®



Please refer to Tata Steel or your local sales representative for dimensions which fall outside of the above matrix.

Surface aspects

Roughness

	Roughness Ra (μm) cut off 2.5 mm	Roughness Ra (μm) cut off 0.8 mm
normal	0.9-1.5	0.75-1.25
high	1.2-1.8	1.00-1.55

Surface quality

DX57-GI HyperForm is available in both unexposed (MB) and exposed (MC) surface quality.

Oiling

DX57-GI HyperForm is supplied with oiled surface. A range of preservative and prelube oils can be applied.

Metal coated HSLA steels, EN10346:2015

General Product Description

Metal coated high-strength low-alloy (HSLA) steels are designed for applications that require galvanic corrosion protection and good formability in relation to high guaranteed yield strength.

Mechanical Properties

	Coating	Standard	Yield strength $R_{p0.2}$ (MPa)	Tensile strength R_m (MPa)	Elongation A_{50} ²⁾ (min %)
HX220LAD	Z, ZA, ZF		220-320	340-400	30
HX260LAD	Z, ZA, ZF	EN10346:2015	260-330	350-430	26
HX300LAD	Z, ZA, ZF	EN10346:2015	300-380	380-480	23
HX340LAD	Z, ZA, ZF	EN10346:2015	340-420	410-510	21
HX380LAD	Z, ZA, ZF	EN10346:2015	380-480	440-560	19
HX420LAD	Z, ZA, ZF	EN10346:2015	420-520	470-590	17
HX460LAD	Z, ZA	EN10346:2015	460-560	500-640	15
HX500LAD	Z, ZA	EN10346:2015	500-620	530-690	13

¹⁾ If no pronounced yield point is present, the 0.2 % yield point value $R_{p0.2}$ is used. If the product has a pronounced yield point, the values apply for the lower yield point $R_{p0.2}$.

²⁾ Decreased minimum elongation A_{50} value for thickness $0.50\text{mm} < t \leq 0.70\text{mm}$ (minus 2 units) and $t \leq 0.50\text{mm}$ (minus 4 units) apply. In addition, in case of ZF coating the minimum elongation A_{50} value is reduced by 2 units.

Mechanical Testing

Testing direction is transversal to the rolling direction. Each metal coated mother coil is regarded as one test unit. Mechanical properties (EN-ISO 6892-1:2009) and coating mass (EN 10346) are determined per test unit.

An inspection document of the required type according to EN 10204 is provided when agreed in the order.

Chemical Composition

	C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Al (min %)	Ti (max %)	Nb (max %)
HX220LAD	0.11	0.50	0.60	0.030	0.025	0.015	0.12	0.09
HX260LAD	0.11	0.50	1.00	0.030	0.025	0.015	0.15	0.09
HX300LAD	0.12	0.50	1.40	0.030	0.025	0.015	0.15	0.09
HX340LAD	0.12	0.50	1.40	0.030	0.025	0.015	0.15	0.10
HX380LAD	0.12	0.50	1.50	0.030	0.025	0.015	0.15	0.10
HX420LAD	0.12	0.50	1.60	0.030	0.025	0.015	0.15	0.10
HX460LAD	0.15	0.50	1.70	0.030	0.025	0.015	0.15	0.10
HX500LAD	0.15	0.50	1.70	0.030	0.025	0.015	0.15	0.10

Content % by mass

Tolerances

The tolerances of these metal coated products are in accordance with standard EN 10143:2006. If no special instructions are given on the order, the products are delivered with the normal tolerances of this standard. Special tolerances according to standard EN 10143:2006 or other tolerance specification can be agreed separately at the time of order.

Coatings and Surfaces

Coatings

The metal coated products are offered with Zinc (Z), Galvan zinc-aluminium (ZA), or Galvannealed zinc-iron alloy (ZF) coating. The cathodic corrosion protection of these metal coatings is in direct proportion to its thickness, i.e. a thick coating will provide better corrosion protection for the underlying steel than a thin coating. However, thin coatings are recommended for applications with high formability requirements.

HX340LAD

Steels with high yield strength
for cold forming – micro-alloyed

Material no.	1.0933
according to	DIN EN 10346/ DIN EN 10143

Surface finish

Thickness ranges

MB	0.50 – 3.00
----	-------------

Chemical composition

(in percent by weight)

	min.	max.
C		0.11 %
Si		0.50 %
Mn		1.00 %
P		0.025 %
S		0.025 %
Ti		0.15 %
Nb		0.09 %
Al	0.015 %	

Mechanical properties (transverse)

Yield strength Re ¹⁾
340 – 420 MPa

Tensile strength Rm
410 – 510 MPa

Total elongation A80
≥21 %

Available dimensions

Thickness in mm	Width in mm ¹⁾
0.50 – 0.68	900 – 1.590
0.69 – 0.86	900 – 1.750
0.87 – 2.50	900 – 1.865
2.51 – 3.00	900 – 1.610

¹⁾ The width of final-trimmed material is reduced by 15 mm.

The samples for the tensile test are taken
at right angles to rolling direction unless

¹⁾ Re_L/R_{p0.2}.