

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**DISERTAČNÍ
PRÁCE**

2023

**MICHAL
VALEŠ**

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

DISERTAČNÍ PRÁCE

**APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ
PRO VÝROBU VNĚJŠÍCH DÍLŮ KAROSERIE**

Ing. Michal Valeš

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Školitel specialista: Ing. František Tatiček, Ph.D.

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Aplikace vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie“ vypracoval samostatně pod vedením školitele doc. Ing. Jana Šanovce, CSc. s použitím uvedené literatury.

Podle § 60 zákona č.121/2000 Sb., O právu autorském a právu souvisejícím s právem autorským, O studiu na vysokých školách a zákona o závěrečných zkouškách, je doktorská práce duševním spoluvlastnictvím autora, vedoucího disertační práce a Fakulty strojní ČVUT. Citace povoluje fakulta. Podmínkou externího použití je smlouva s řešiteli. Dále prohlašuji, že tato disertační práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

V Praze dne

Ing. Michal Valeš

Poděkování

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování školiteli doc. Ing. Janu Šanovcovi, CSc., a školiteli specialistovi Ing. Františku Tatíčkovvi, Ph.D., za jejich cenné rady a trpělivost při vedení mé disertační práce. Rovněž bych chtěl poděkovat za vstřícnost, spolupráci a pomoc při získání potřebných informací a podkladů oddělení konstrukce lisovacího nářadí ve firmě ŠKODA AUTO, a.s., jmenovitě pak Ing. Petru Chaloupeckému a Ing. Tomáši Pačákovi, Ph.D.

Rodině děkuji za podporu během celého studia.

Anotace

Název práce: Aplikace vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie
Autor: Ing. Michal Valeš
Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.
Odborný školitel: Ing. František Tatíček, Ph.D.
Katedra: ČVUT v Praze, Fakulta strojní, Ústav strojírenské technologie

Klíčová slova: vysokopevnostní ocel, lisování, numerická simulace, automobilový průmysl, vnější pohledové díly karoserie, DP500, CR290Y490T-DP, AutoForm

Abstrakt: Předkládaná disertační práce se zaměřuje na použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie. Hlavním cílem disertační práce je příprava metodiky pro nasazení těchto ocelí při sériové výrobě vozů technologií lisování a ověření metodiky pro vybrané díly a materiálovou jakost. Motivací pro vznik práce jsou společně se snížením hmotnosti karoserie i zvýšení užitečných vlastností dílů. V rešeršní části práce je uveden rozbor současného stavu poznání společně s vysvětlením technologií a skutečností uváděných v experimentální části práce. Důraz je kladen především na nehmotnou přípravu výroby související s numerickými simulacemi procesu lisování. V práci je uveden kontrolní list numerické simulace, jehož cílem je, s ohledem na současný stav poznání, dosáhnout co nejvyšší shody mezi výsledky numerické simulace a fyzickými výlisky. Navržená metodika je ověřena na vybraných výliscích: rotačně symetrický kalíšek, čtyřhranná nádoba, vnější dveře zadní a páté dveře spodní. Sledovaným materiálem je vysokopevnostní ocel CR290Y490T-DP (DP500), který je úspěšně nasazen na díl spodních pátých dveří vozu ŠKODA OCTAVIA čtvrté generace.

Rozsah práce a příloh

Počet stran	122
Počet obrázků	89
Počet tabulek	21
Počet příloh	2

Annotation

Title: The application of high-strength steels for production of outer car body parts

Autor: Ing. Michal Valeš

Supervisor: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Supervisor specialist: Ing. František Tatiček, Ph.D.

Department: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Manufacturing Technology

Keywords: High Strength Steel, Sheet Metal Forming, Numerical Simulation, Automotive, Outer panel parts, DP500, CR290Y490T-DP, AutoForm

Abstract: The presented dissertation focuses on the use of high-strength steels to produce outer car body parts. The main goal of the dissertation is to prepare a methodology for using these steels in the serial production of cars and to verify methodology for selected parts and material quality. The motivation for the creation of the work is, together with the reduction in the body's weight, the increase in the functional properties of the parts. The research part of the work contains an analysis of the current state of knowledge and an explanation of the technologies and facts presented in the experimental part of the work. Emphasis is placed primarily on intangible production preparation related to numerical simulations of the pressing process. The thesis presents a numerical simulation control sheet, the aim of which, concerning the current state of knowledge, is to achieve the highest possible agreement between the numerical simulation results and the physical stampings. The proposed methodology is verified on selected parts: a rotationally symmetrical cup, a square container, the rear outer door, and the tailgate outer lower. The monitored material is high-strength steel CR290Y490T-DP (DP500), successfully used on the tailgate lower of the fourth generation ŠKODA OCTAVIA.

Volume of work

Number of pages	122
Number of pictures	89
Number of tables	21
Number of attachments	2

Obsah

1	Úvod.....	- 1 -
Přehled současného stavu řešené problematiky		
2	Technologie lisování karosářských výlisků.....	- 3 -
2.1	Problematika odpružení.....	- 4 -
2.2	Tvářitelnost ocelí.....	- 5 -
2.2.1	Hodnocení tvářitelnosti.....	- 6 -
2.3	Mezní stavy při lisování.....	- 8 -
3	Problematika popisu deformačního chování ocelových materiálů.....	- 10 -
3.1	Křivka zpevnění, podmínka plasticity.....	- 10 -
3.1.1	Rychlost deformace.....	- 12 -
3.2	Porušení materiálu.....	- 12 -
3.2.1	Nelineární deformační dráha.....	- 13 -
3.2.2	Model porušení Hosford-Coulomb.....	- 14 -
4	Oceli využívané pro výrobu pohledových dílů karoserie.....	- 15 -
4.1	IF oceli.....	- 15 -
4.2	Bake Hardening oceli.....	- 15 -
4.3	DP oceli.....	- 16 -
4.4	Budoucí vývoj AHSS ocelí.....	- 19 -
5	Podpora tvářecího procesu.....	- 21 -
5.1	Fotogrammetrie.....	- 21 -
5.1.1	3D skenery.....	- 21 -
5.1.2	System ARGUS.....	- 22 -
5.2	Numerické simulace v plošném tváření.....	- 23 -
5.2.1	Robustnost procesu.....	- 24 -
6	Cíle disertační práce.....	- 25 -
Experimentální část práce		
	Úvod k experimentální části práce.....	- 26 -
7	Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace.....	- 28 -
7.1	Nastavení výpočetní sítě.....	- 29 -
7.2	Tribologie.....	- 31 -
7.3	Rychlost deformace.....	- 32 -
7.4	Operace měření odpružení.....	- 33 -
8	Hodnocení vyrobitelnosti dílů z vysokopevnostní oceli.....	- 34 -
8.1	Rotačně symetrický výlisek.....	- 35 -
8.1.1	Měření pomocí systému ARGUS.....	- 36 -
8.1.2	Numerická simulace.....	- 38 -
8.1.3	Metalografická analýza pro měření tloušťky plechu.....	- 40 -
8.1.4	Vyhodnocení, dílčí závěr.....	- 42 -

8.2	Čtyřhranná nádoba s designovou hranou	43 -
8.2.1	Měření pomocí systému ARGUS	45 -
8.2.2	Numerická simulace	46 -
8.2.3	Metalografická analýza pro měření tloušťky plechu	47 -
8.2.4	Vyhodnocení, dílčí závěr	49 -
8.3	Fabia III, dveře vnější zadní	51 -
8.3.1	Materiálové karty	51 -
8.3.2	Charakteristika dílu a lisovacího procesu	52 -
8.3.3	Vyhodnocení, dílčí závěr	54 -
8.4	Rapid Spaceback, páté dveře vnější spodní	56 -
8.4.1	Výsledky experimentu	56 -
8.4.2	Analýza odpružení s použitím 8 RPS bodů a 2 pilotů	57 -
8.4.3	Analýza odpružení s použitím 5 bodů RPS a 2 piloty	58 -
8.4.4	Vyhodnocení, dílčí závěr	59 -
8.5	Octavia 4, páté dveře vnější spodní	60 -
8.5.1	Hodnocení vyrobitelnosti dílu	63 -
8.5.2	Robustnost procesu	66 -
8.5.3	Lisovací zkoušky na prototypovém nástroji	67 -
8.5.4	Lisovací zkoušky na sériovém nástroji	69 -
8.5.5	Sestava pátých dveří	71 -
8.5.6	Výsledky, dílčí závěr	74 -
9	Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření	75 -
9.1	Kontrolní list numerické simulace	78 -
10	Diskuze dosažených výsledků	80 -
11	Závěr	83 -
11.1	Splnění cílů disertační práce	83 -
11.2	Přínos disertační práce	85 -
11.3	Návrh dalšího rozvoje	86 -
	Seznam použité literatury	87 -
	Publikace autora vztahující se k disertační práci	92 -
	Seznam použitých obrázků	95 -
	Seznam použitých tabulek	98 -
	Přílohy	99 -
	Příloha č. 1, Auditové hodnocení dílu pro projekt FABIA III	99 -
	Příloha č. 2, Vyplněný kontrolní list numerické simulace pro díl HKau	105 -

Seznam použitých zkratek a symbolů

AHSS	Advanced High Strength Steels – zpravidla souhrnné označení pro vysokopevné oceli s mezí pevností nad 800 MPa. Tyto oceli se vyznačují vysokým obsahem legujících prvků a kombinací strukturních fází
BH	Bake Hardening efekt – dodatečné zpevnění materiálu během vypalování laku
CAD	Computer-aided Design – počítačem podporované projektování
CE (CE+)	Compact Evaluation – parametry výpočtu a sítě v programu AutoForm Forming
DIC	Digital Image Correlation – digitální korelace obrazu
FEM	Finite Element Method – metoda konečných prvků (MKP)
FLC	Forming Limit Curve – křivka mezních přetvoření
FLD	Forming Limit Diagram – diagram mezních přetvoření
FV	Final Validation – parametry výpočtu a sítě v programu AutoForm Forming
GFD	Global Formability Diagram – diagram reprezentující skupiny ocelí s ohledem na jejich pevnost a tažnost
GFLC	Generalized Forming Limit Diagram – model zohledňující mezní deformaci s ohledem na deformační dráhu (vyvinutý na Technische Universität München)
GSA	Grid Strain Analysis – optická metoda hodnocení deformace na povrchu plechu
HKA0	Heckklappe Außenblech oben (DE) – vnější horní páte dveře
HKAU	Heckklappe Außenblech unten (DE) – vnější spodní páte dveře
HSLA	High strength low alloy steels – vysokopevné mikrolegované oceli (s obsahem manganu až do 2 %, uhlíku v rozmezí 0,05 – 0,5 %)
HSS	High strength steels – konvenční vysokopevné oceli (jednofázové feritické oceli s potencionální složkou perlitu)
IF	Interstitial Free – ocel s velmi nízkým obsahem intersticiálně rozpuštěného hliníku používaná pro tvarově složité tažné operace
MNG	Procentuální využití plochy nástřihu
KUT	Komplexní ukazatel tváritelnosti – vybraná kombinace mechanických vlastností sloužící k hodnocení tváritelnosti materiálu
NCM Data	Numerically Controlled Mill Data – Data nástroje, na které jsou vytvářeny technologické postupy pro obrábění ploch nástroje
OP20	Operace 20 – lisovací operace č. 20 (zpravidla: 10 tvorba nástřihu; 20 operace tažení; 30 střížná operace; 40, 50, 60, 70 operace střížná a kalibrovací)
RPS	Reference Point System – referenční měřicí systém
SBBR	Stand-Brems-Blink-Rückleuchte (DE) – zkratka pro soubor zadních světel automobilu

SI	Le Système International d'Unités (FR) – mezinárodní soustava jednotek fyzikálních veličin
SRS	Strain Rate Sensitivity – Vliv rychlosti deformace
TAH	Tür Außenblech hinten (DE) – vnější dveře zadní
TAV	Tür Außenblech vorn (DE) – vnější dveře přední
TM	Teilmodell (DE) – model výlisku navrhnutý oddělením vývoje dílů
TRIP	Transformation induced plasticity – oceli s transformačně indukovanou plasticitou
TWIP	Twinning induced plasticity – oceli s plasticitou vyvolanou dvojčatěním
UHSS	Ultra High Strength Steel – oceli s mezí pevnosti nad 1000 MPa

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
<i>F</i>	Síla	N
<i>p</i>	Tlak	Pa
<i>A</i>	Tažnost	%
<i>A_{g80}</i>	Plastické prodloužení měřené při maximálním zatížení (homogenní tažnost), počáteční délka zkoušené oblasti 80 mm	%
<i>R_m</i>	Smluvní mez pevnosti	N·mm ⁻²
<i>R_{p0,2}</i>	Smluvní mez kluzu	N·mm ⁻²
ϵ	Poměrné prodloužení	-
<i>n</i>	Exponent deformačního zpevnění	-
<i>r_l</i>	Součinitel plastické anizotropie	-
<i>E</i>	Modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	N·mm ⁻²
σ_0	Napětí na mezi kluzu	N·mm ⁻²
<i>R_{p0,2}</i>	Smluvní mez kluzu (0,2% deformace)	N·mm ⁻²
<i>R_m</i>	Mez pevnosti	N·mm ⁻²

Seznam použitých technických termínů

Hlubokotažný materiál – zpravidla nízkouhlíková ocel s minimálním obsahem legujících prvků.

Jedná se zejména o materiály vyznačující se vysokou tvářitelností a využívané pro výrobu výlisků v automobilovém průmyslu (např. CR4, CR5, aj.).

Local Best Fit – metoda pro nalezení nejlepší shody mezi tvarem naskenovaného modelu a referenčních dat (zpravidla CAD) pro vybranou oblast.

Materiálová karta – soubor mechanických vlastností popisující deformační chování materiálu pro potřeby numerické simulace. Materiálová karta vždy obsahuje základní vlastnosti (modul pružnosti, Poissonovu konstantu a měrnou hmotnost), křivku zpevnění, podmínku plasticity a křivku mezních přetvoření FLC.

Odpružení materiálu – rozměrová odchylka tvaru způsobená elastickou složkou deformace v okamžiku, kdy dojde k ukončení tvářecího procesu.

Pohledová oblast 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.

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.

Propad materiálu – (povrchová vada, „propadlina“) lokální nerovnost materiálu způsobená tlakovým napětím a zpravidla i nedostatečným přetvořením materiálu během tvářecího procesu, nejčastěji způsobená lokální geometrií lisovacího nástroje. Propad materiálu je tvořen v řádech desetin až setin milimetru. Kvůli propadům dochází k lámání světelných paprsků, které narušují vizuální pohled na konečný produkt (především na lakované díle). Na nelakovaném výlisku může být obtížné tyto propady sledovat. K analýze propadů je využíváno „brouskovací“ metody (lehké poškrábání plechu pomocí brousku).

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 variací okrajových podmínek lisovacího procesu.

Šedá zóna dílu – oblast na výlisku, která v hotovém vozidle není na první pohled viditelná. 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.

Tahový model – geometrie nástroje v tažné operaci. Jedná se o geometrii, která vychází z modelu dílu. Tahový model navíc obsahuje tažné hrany a poloměry, přidržovací plochu, aj. a vytváří tak tvar matrice a tažníku.

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.

Tribologická karta – soubor popisující hodnotu Coulombova koeficientu tření s ohledem na množství maziva, kontaktní tlak, drsnost plechu a nástroje, deformaci plechu, relativní rychlost posuvu a teplotu.

Tušírování – metoda využívaná při zpracování lisovacích nástrojů. S pomocí tušírovací barvy je možné po provedení pracovního zdvihu sledovat kvalitu spasování kontaktních ploch. Cílem je zajistit ideální kontakt v systému „nástroj – plech – nástroj“ ve vybraných oblastech.

Tvářitelnost materiálu je schopnost materiálu vytvořit požadovaný jakostní výrobek plastickou deformací za tepla nebo za studena bez porušení materiálu.

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

Výtažek – v praxi je tímto slovem označován plech po první tažné operaci.

Ztenčení materiálu – změna deformace ve směru tloušťky plechu během tvářecího procesu. Oblasti s větším ztenčením materiálu zvyšují riziko vzniku porušení, resp. trhlin. Kritické hodnoty ztenčení materiálu se liší s ohledem na použitý materiál a stav deformace.

Zvlnění materiálu – tvorba vln, která je zpravidla způsobená radiálním tlakovým napětím. Vlivem geometrie nástroje dochází ke zvlnění velmi často v rohových oblastech, ve kterých je materiál vtahován do dutiny nástroje.

1 Úvod

Významným tématem dnešní doby je vliv člověka na životní prostředí. Koncept udržitelnosti a uhlíkové neutrality se stává předmětem zájmu prakticky celé společnosti. S ohledem na tuto skutečnost a zvyšování bezpečnostních standardů pro automobily se vývoj odolných a lehkých vozů stal důležitým tématem v automobilovém průmyslu. Snižování hmotnosti karoserie je cílem výrobců automobilů bez ohledu na použití spalovacích, elektrických nebo vodíkových pohonů. Produkce CO₂ je detailně sledována ve fázi výroby i provozu automobilů.

Pro splnění této potřeby musí být pro výrobu dílů karoserie pomocí technologie plošného tváření za studena použity materiály s příznivějším poměrem pevnosti a měrné hmotnosti. Oceli určené pro stavbu karoserie v současnosti prochází významným vývojem. Nové materiály dosahují vyšší pevnosti při zachování tvárnosti a současně splňují nároky nutné pro stavbu karoserie, např. dobrou povrchovou kvalitu a svařitelnost. Tato skutečnost umožňuje modifikovat pohledové i konstrukční díly v rámci vývoje vozů.

S použitím vysokopevnostních ocelí je ale spojena i vyšší míra odpružení dílů a vyšší reakční síly během lisovacího procesu. Nižší tloušťka použitého plechu může vést současně k problémům při spojování nebo ke vzniku vibrací při provozu. Metodický plán a geometrie dílu musí reflektovat zmíněné skutečnosti a být navržena tak, aby nedocházelo k porušení materiálu z důvodu kritického přetvoření dílu, ke tvorbě zvlnění či jiných auditových závad, a díl byl za přijatelnou cenu vyrobitelný. V případě využití vysokopevnostní oceli se sníženou tvárností je její použití podmíněno typem povrchového vylisku automobilové karoserie.

V případě, kdy vylisky nesplňují požadavky na ně kladené, je modifikace již zhotovených lisovacích nástrojů nákladná a z hlediska termínového plánu problematická. Dodatečné konstrukční a fyzické činnosti (frézování, broušení, zapracování, nanášení povrchových vrstev) současně vedou k značným finančním ztrátám. S ohledem na výše zmíněné důvody lze pozorovat rostoucí důležitost použití numerické simulace v přípravné fázi výroby.

Techniky modelování procesů tváření kovů mají obecně tři hlavní cíle. Za prvé, analýza je zaměřena na eliminaci případných chyb v návrhu výrobního procesu nebo nástroje (nebo optimalizaci). Za druhé, tato analýza poskytuje uživateli možnost upravit díl nebo proces tak, aby byla výroba jednodušší a efektivnější. Za třetí, simulace umožňuje uživateli

vyřešit náhlé problémy, které mohou nastat v již zavedeném výrobním procesu. Použití numerických simulací tedy přináší lepší vhléd do procesu a také prostředky ke snížení nákladů na výrobu nástrojů. Virtuální modifikace nástroje jsou významně rychlejší, levnější a poskytují požadovanou agilitu.

Přesnost numerické simulace je ovlivněna jejími okrajovými podmínkami. V souvislosti s použitím vysokopevnostních ocelí může docházet ke snížení okna vyrobitelnosti pro vybrané díly a tím i k potřebě zvýšení přesnosti predikce numerické simulace. Pro dosažení dostatečně spolehlivého návrhu je tudíž nutné udržet krok s aktuálním stavem poznání a nejmodernějšími technologiemi. Významným faktorem pro efektivní hodnocení a minimalizaci finančních ztrát je současně tlak kladený z hlediska konkurenceschopnosti.

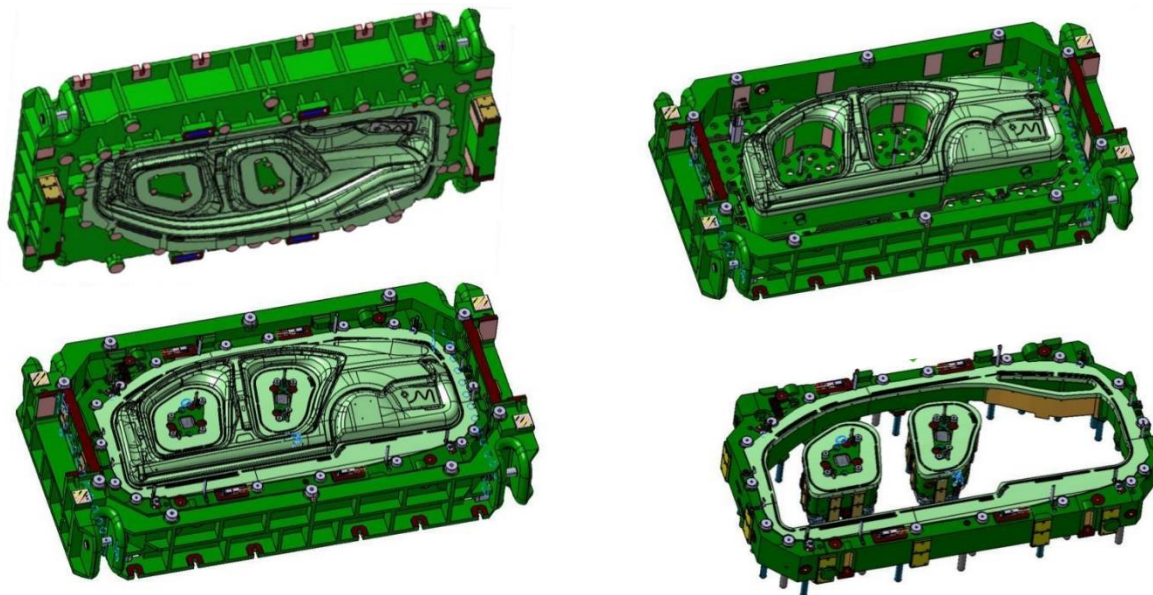
Souvisejícím tématem je tvorba digitálního dvojčete pro produkční linky i samotné produkty. V rámci dosažení tohoto cíle je nutné pokrýt veškeré kroky výrobního procesu, které ovlivňují charakter produktu. Tato skutečnost prakticky vyžaduje využití numerické simulace pro plošné tváření, která by měla být doplněna o simulaci spojování a lakování. V případě využití numerické simulace sestavy je nutné, aby veškeré komponenty obsahovali deformační a napěťovou charakteristiku vycházející z průběhu jejich výroby.

Ve vztahu k plošnému tváření kovů za studena poukazuje výše uvedený text na potřebu hledání takových řešení, která korespondují s trendem rostoucího využití virtuálního návrhu výrobních procesů a současně umožní nasazení vysokopevnostních ocelí pro lisování vnějších dílů automobilové karoserie.

2 Technologie lisování karosářských výlisků

Lisování je jednou z nejrozšířenějších metod tváření plechu. Mezi odvětví, v němž se tato metoda významně využívá, se řadí především výroba karosářských dílů v automobilovém průmyslu. Výlisky se zpravidla vyrábějí ve více tvářecích operacích. Důvodem může být geometrická složitost výlisku (nemožnost zhotovení výlisku pohybem nástroje v jediném směru), míra deformace (nutné rozdělení do více tvářecích kroků) a současně i potřeba navazujících střižných a kalibračních operací. [1]

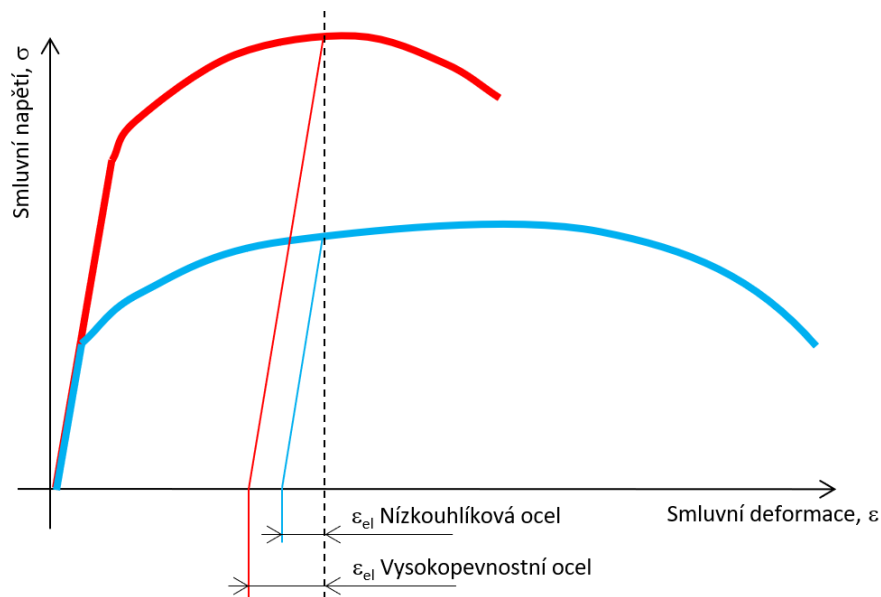
Tažení plechu bývá při výrobě automobilových výlisků zpravidla první tvarovací operací. Návrh tažného nástroje je s ohledem na míru deformace, geometrickou složitost výlisků a další vizuální kritéria kladená na výlisk často časově nejnáročnější. Proces tažení může být ovlivněn silou na přidržovači, brzdícími drážkami, velikosti přístřihu plechu, třením / mazáním a tažnými pomůckami (rozpěrkami), ale i dalšími faktory ovlivňujícími výrobní proces. Tato skutečnost umožňuje na základě zkušenosti s lisováním a s pomocí numerické simulace ovlivnit průběh tažení plechu. V průběhu tažení nebývá (s ohledem na stabilitu výroby) tolerován vznik nestability, jako jsou trhliny, zvlnění apod. [1,2] Příklad tažného nástroje použitého pro výrobu postranice vozu je uveden na obrázku 2-1.



Obrázek 2-1, Model tažného nástroje, levá postranice automobilu

2.1 Problematika odpružení

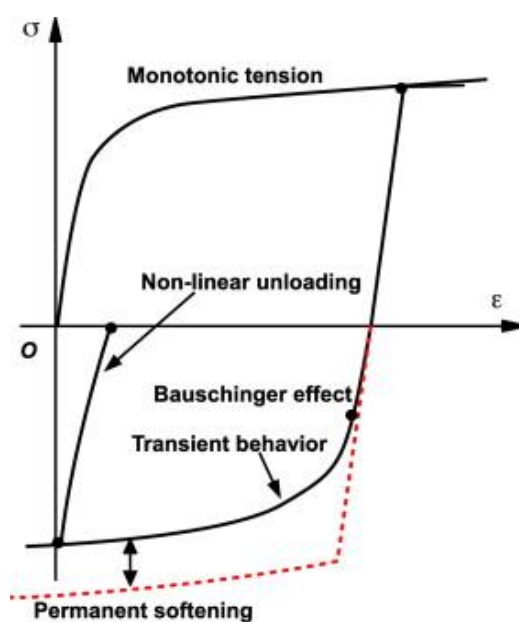
Odpružením materiálu se rozumí tvarové změny výlisku po tváření, které jsou vyvolány elastickými deformacemi ve výlisku. Odpružení dílů je jedním z výraznějších problémů při použití vysokopevnostních ocelí a neželezných kovů pro výrobu vnějších dílů karoserie. Velikost odpružení roste u materiálů s vyšší hodnotou meze kluzu a meze pevnosti, jak je ukázáno na obrázku 2-2. Zpřesnění predikce odpružení je předmětem řady výzkumných publikací. [3-7]



Obrázek 2-2, Vliv pevnostních vlastností oceli na podíl elastické deformace [1]

Neodpovídající rozměry součásti nejsou jediným důsledkem odpružení. Výskyt tlakových elastických deformací je zpravidla příčinou výskytu řady dalších nedostatků pohledových dílů. V případě nedostatečného zakřivení plochy může docházet v důsledku tlakových napětí k tzv. lupavce (*angl. oil canning*), kdy pro danou oblast existují 2 stabilní polohy. Současně může toto tlakové působení vést k tvorbě propadů a dalších vizuálních nedostatků na dílech. [8, 9]

Podmínkou pro správnou predikci odpružení je znalost mechanických vlastností zpracovávaného materiálu. Klíčovým aspektem je charakteristika zpevňování, která je blíže popsána v kapitole 3.1. Bauschingerův efekt je jev, kdy při změně z tahové na tlakovou napjatost dochází k poklesu meze kluzu, průběhu zpevňování a trvalému poklesu pevnosti s ohledem na míru deformace (*Permanent softening*). Parametry, které popisují míru Bauschingerova efektu jsou odlišné pro vybrané jakosti materiálu, nelze tedy stanovit jednotné proměnné pro veškeré oceli, ale je nutné jej experimentálně stanovit pro každou materiálovou jakost a výrobce. [8, 10]. Princip Bauschingerova efektu je zobrazen na obrázku 2-3.



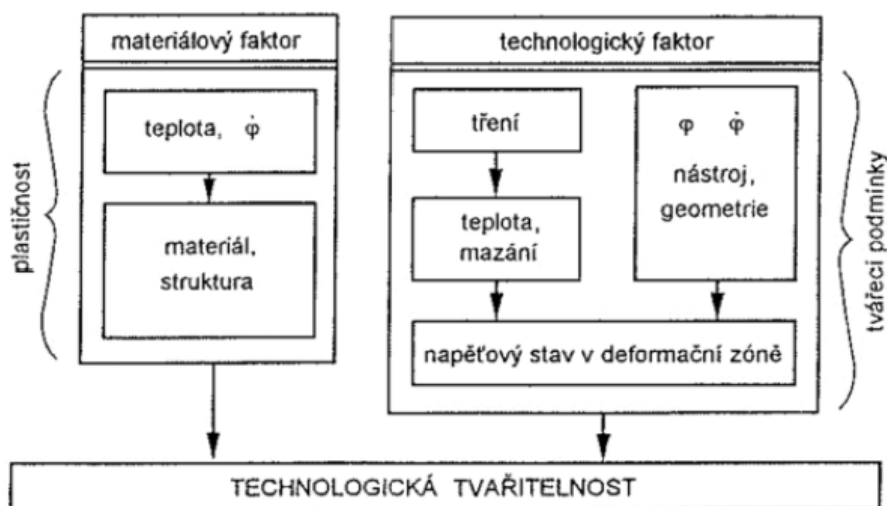
Obrázek 2-3, princip Bauschingerova efektu [10]

V rámci kompenzace odpružení jsou prováděny korekce na tvářecím nářadí tak, aby byla splněna rozměrovost dílu. Míra korekce je zpravidla úzce spjata s tvarovou složitostí dílu a s požadovanou rozměrovou tolerancí. Obecným doporučením je, aby deformace v celé ploše výtazku dosáhla hodnot nejméně 3%. Kompenzace odpružení v předvýrobní fázi výroby nástrojů vede ke snížení finančních i časových nákladů. [8, 9, 11]

2.2 Tvářitelnost ocelí

Tvářitelnost (plasticita) je schopnost materiálu trvale měnit svůj tvar při působení vnějších sil, aniž dojde k porušení tvářeného tělesa. Tvářitelnost je závislá nejen na chemickém složení a krystalické struktuře tvářeného materiálu, ale i na konkrétních deformačních, napěťových a teplotních podmínkách uvažovaného tvářecího postupu. [2, 12]

Kovové materiály není možné jednoznačně rozdělit na materiály křehké a plastické. Tentýž materiál se může chovat jako křehký nebo plastický v závislosti na teplotě, stavu napjatosti, deformační rychlosti apod., tedy podle kombinace tvářecích faktorů, které charakterizují příslušný tvářecí postup. V praxi se schopnost kovů k plastické deformaci často spojuje s jejich upotřebitelností pro zpracování danou technologií. Brána v úvahu musí být přetvárná pevnost, která ovlivňuje velikost tvářecí síly a energetickou náročnost tvářecí operace. Jelikož plastičnost je podmíněna technologickými podmínkami daného tvářecího procesu, lze hovořit o technologické tvářitelnosti, viz obrázek 2-4. [1, 13]



Obrázek 2-4, Faktory ovlivňující technologickou tvářitelnost [13]

2.2.1 Hodnocení tvářitelnosti

Tvářitelnost vybraného materiálu lze hodnotit základními mechanickými zkouškami nebo odvozenými technologickými zkouškami, kdy je tvářitelnost definována ukazatelem velikosti plastického přetvoření do porušení tělesa.

Základní posouzení tvářitelnosti se pravidla provádí na základě výsledků získaných zkouškou tahem při pokojové teplotě dle normy (ČSN) EN ISO 6892-1 *Kovové materiály – Zkoušení tahem – Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*) [14]. Principem zkoušky je deformace zkušebního tělesa (předepsaného tvaru) tahovým zatížením za účelem stanovení mechanických vlastností. Využitím moderních DIC metod lze současně zjistit charakter deformace zkušebního tělesa.

S ohledem na využití získaných mechanických vlastností pro definici chování materiálu pro numerickou simulaci jsou pomocí zkoušky tahem zpravidla vždy stanoveny:

- Mez kluzu a mez pevnosti [14]
- Plastické prodloužení při maximálním zatížení (homogenní tažnost) [14]
- Exponent deformačního zpevnění [15]
- Součinitel plastické anizotropie [16]

Z hlediska ověření chování materiálu při vybraných způsobech zatěžování jsou využívány především zkoušky: [13, 17, 18, 19, 20]

- Zkouška vyboulením (Bulge test) [21]
- Stanovení křivek mezní tvářitelnosti (FLC) [22]
- Zkouška hloubením [23]
- Zkouška rozšiřováním otvoru (Hole Expansion Test) [24]
- Zkouška tažením v kuželové tažnici (Fukui) [25]
- Zkouška vyboulení (Yoshida Buckling Test) [26]

V praxi je možné setkat se i s tzv. ukazateli tvářitelnosti nebo komplexními ukazateli tvářitelnosti (KUT), které společně hodnotí vybrané mechanické vlastnosti. Příklad KUT je uveden v rovnici 2-1 [2, 27]:

$$KUT = \frac{R_{p0,2}}{R_m} \cdot A_{g80} \cdot n \quad (2-1)$$

2.3 Mezní stavy při lisování

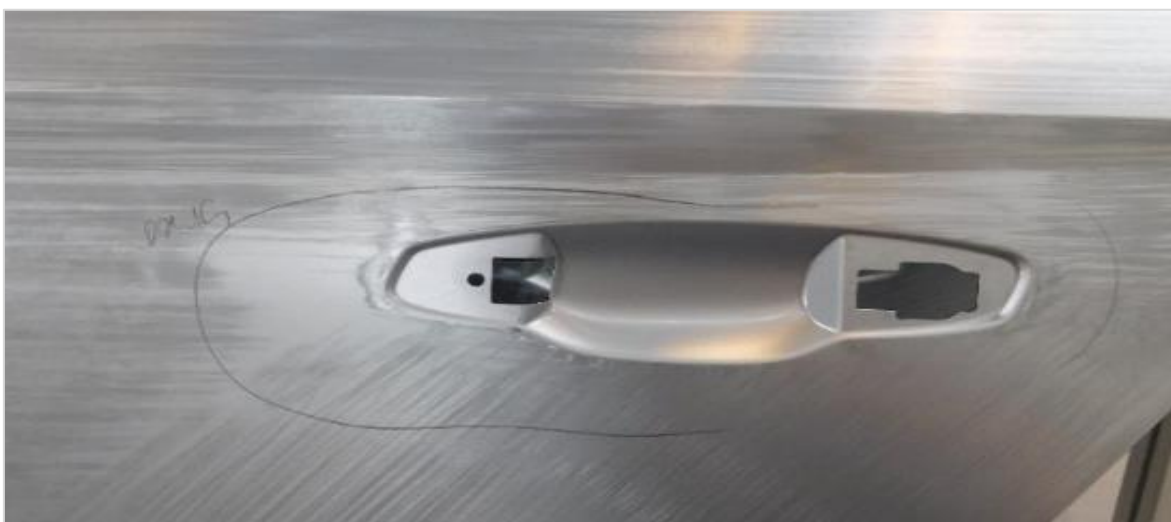
Navzdory dodržení technologických podmínek a respektování všech předpokladů výroby dochází v procesu lisování, např. v důsledku nevhodného návrhu lisovacího nástroje, ke vzniku mezních stavů, defektů. Tyto mezní stavy výtažku lze v ojedinělých případech klempířskými technologiemi a postupy opravit, některé však opravitelné nejsou. Mezi defekty řadíme [27, 28]:

- Lokální nehomogenní deformace, tzv. krček
- Porušení výlisku (Obrázek 2-5, Porušení výtažku) Obrázek 2-5, Porušení výtažku
 - K porušení dochází v momentě vyčerpání plastických schopností materiálu. Mezi místa se zvýšeným výskytem trhlin patří vrcholy kulové geometrie (dvouosý tah), rohové oblasti pod přidržovačem (tah-tlak), tažné stěny (plain strain – jednoosá deformace) a hrany přístříhu (jednoosý tah). Vznik trhlin může být způsoben i v důsledku náhodných nečistot ve struktuře materiálu [28, 29]
- Zvlnění materiálu
 - Zvlnění se u hlubokého tažení vyskytuje v oblastech s napětím tah-tlak. Jejich tvorba souvisí s působením tangenciálního tlakového napětí vznikajícího při tažení. Vznik zvlnění lze ovlivnit silou na přidržovači, případně lokálním prolisováním vedoucím k tahovému napětí (tj. spotřebování materiálu). Vyplývajícím rizikem zvlnění je znemožnění úplného zavření nástroje. Výskyt zvlnění lze tolerovat pouze v oblastech, které budou dále ostříženy.
- Přetažená hrana
 - Ke vzniku přetažené hrany dochází v důsledku relativního pohybu mezi plechem a nástrojem v místě s malým poloměrem a od určitého úhlu opásání kolem poloměru nástroje (hrana razníku, „feature line“). Jedná se o vizuální defekt výtažku. Odstranění závady je možné přidáním brzdících lišt, případně změnou konstrukce nástroje.
- Propady (Obrázek 2-6, Lokální propad v oblasti prolisu pro kliku dveří)
 - Jedná se o lokální odchylku povrchu od požadované geometrie, a to většinou v oblastech s nízkým zakřivením. Propady mohou vznikat z důvodu nedostatečné plastické deformace v centru ploché geometrie nebo v oblastech kolem prolisů (madlo dveří, směrová světla). Takto vzniklé vady lze odstranit úpravou nástroje nebo dílu vedoucí k odlišné napjatosti v oblasti nebo lokální úpravou geometrie nástroje (tzv. bombírováním). [30]

- Odření povrchu plechu z důvodu akumulace povrchové vrstvy (např. zinku) na nástroji (*angl. galling*).
- Propsání jiných funkčních částí nástrojů (odvzdušňovací otvory, otvory pro střížníky apod.).
- Olejové otlaky.
- Mechanické otlaky, otřepty, zálisy a propadliny.



Obrázek 2-5, Porušení výtažku



Obrázek 2-6, Lokální propad v oblasti prolisu pro kliku dveří

3 Problematika popisu deformačního chování ocelových materiálů

3.1 Křivka zpevnění, podmínka plasticity

Deformační chování materiálu je v simulačních softwarech definováno křivkou zpevnění (*angl. Hardening Curve*) a přechod do plastického stavu pak podmínkou plasticity (*angl. Yield Locus*). Volba popisu křivky zpevnění a podmínky plasticity je významným bodem při sestavení materiálové karty, resp. okrajových podmínek numerické simulace.

Vliv definice křivky zpevnění, podmínky plasticity i křivky FLC je předmětem řady publikací. S ohledem na publikace [18, 19, 31-37] je v tabulce 3-1 uveden přehled doporučených definic pro simulační softwary.

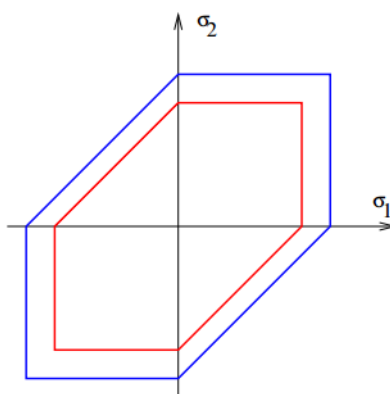
Tabulka 3-1, Doporučená definice křivky zpevnění, podmínky plasticity a FLC s ohledem na aktuální stav poznání (horní řádek = vyšší přesnost)

Křivka zpevnění	Podmínka plasticity	FLC
Yoshida-Uemori [38] (včetně kinematického zpevnění)	BBC-2005 [41] (včetně změřeného biaxiálního bodu)	Nakajima test [42] nebo Marciniak test [43]
Kombinace Swift/Hockett-Sherby [39, 40]	Corus-Vegter Lite [33]	Aproximace dle Abspoel & Scholting [44]

Pro úplnost jsou uvedeny tři nejčastější typy zpevnění materiálu: izotropní, kinematické a jejich kombinace (Yoshida-Uemori nebo Lemaitre-Chaboche). [45]

Izotropní model – velikost následných podmínek se proporcionálně zvětšuje, tyto podmínky plasticity dále nemění svoji polohu, viz obrázek 3-1, kde křivka napětí má charakter:

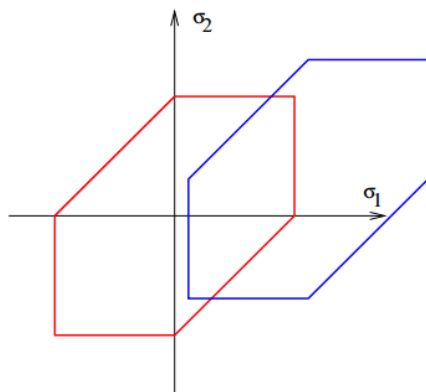
$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij}) - K = 0 \tag{3-1}$$



Obrázek 3-1, Schéma izotropního zpevnění materiálu. [45]

Kinematický model – následné podmínky plasticity mění polohu, ale jejich tvar a velikost jsou shodné s (počáteční) podmínkou plasticity, viz obrázek 3-2, kde křivka napětí má charakter:

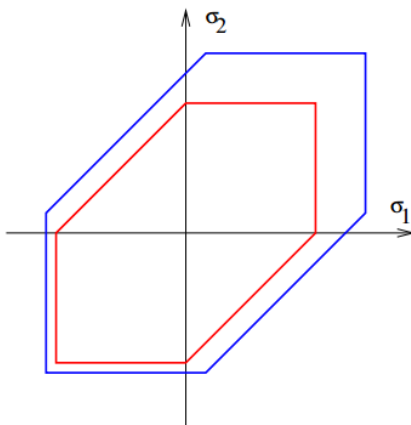
$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) = 0 \quad (3-2)$$



Obrázek 3-2, Schéma kinematického zpevnění materiálu. [45]

Kombinovaný Yoshida – Uemori model – následné podmínky plasticity mění polohu a současně se proporcionálně zvětšují. Popis nejvíce odpovídá chování skutečných látek, viz obrázek 3-3, kde křivka napětí má charakter:

$$f(\sigma_{ij}, K_i) = f_0(\sigma_{ij} - \alpha_{ij}) - K = 0 \quad (3-3)$$



Obrázek 3-3, Schéma kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [45]

3.1.1 Rychlost deformace

V literatuře je vliv rychlosti deformace sledován především u středně a vysoce pevných ocelových materiálů a neželezných kovů (pevnostní částí karoserie) či u velmi vysokých hodnot rychlosti deformace (nad 100 s^{-1}) [46-48]. Vzhledem k závěrům uvedeným v [49-52] a současné úrovni poznání je však nutné tento parametr více zkoumat i z hlediska výroby povrchových dílů karoserie v automobilovém průmyslu. Bližší porozumění rychlosti deformace je důležité z hlediska popisu chování materiálu v lisovacím procesu.

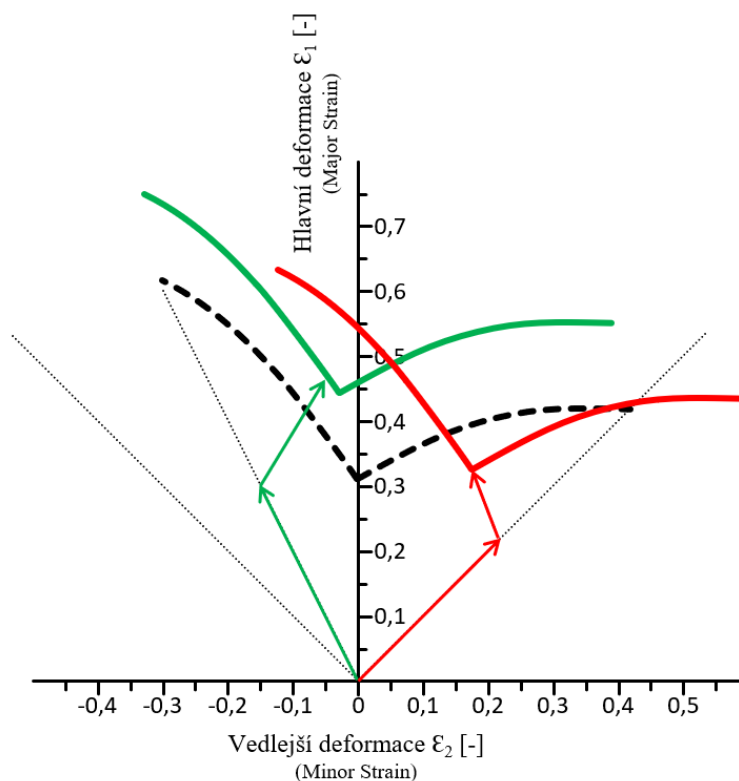
3.2 Porušení materiálu

Nejběžnějším způsobem porušení při tváření plechu je porušení na základě lokalizované deformace. Hranice mezní homogenní deformace je tradičně vyjádřena pomocí křivky FLC. Křivka FLC je nejčastěji stanovena na základě souboru měření [42, 43], hodnotících právě míru deformace, při které dochází k lokalizaci deformace a ke tvorbě krčku, a to za různých stavů napjatosti. Alternativní možností je stanovení křivky FLC na základě empirických vztahů k mechanickým vlastnostem [54-57]. Statická křivka FLC je ale limitována několika skutečnostmi:

1. Lineární dráha deformace: Zkoušky podle Nakajimy jsou jednokrokové zkoušky. Princip zatěžování zůstává neměnným v celém průběhu zkoušky. V inženýrské praxi ale dochází během lisování plechu ke změnám zatěžování, a to především v navazujících operacích (např. kalibrace po stříhání). [2]
2. Pouze tahová napětí: S ohledem na tvar nástrojů používaných při zkoušce podle Nakajimy je při zkoušení tenkých plechů vliv ohýbání nevýznamný. Porušení je tedy hodnoceno pouze na základě tahových napětí. V lisovacím nástroji je ale materiál často významně ohýbán (např. při průchodu brzdící drážkou), čím je ovlivněna odolnost materiálu proti vzniku lokální deformace [54]
3. Rovinná deformace: Během zkoušek je plech v kontaktu s tvářícím nástrojem pouze z jedné strany. V případě lisování s vůlí menší, než je tloušťka plechu, je ale plech ovlivněn významným tlakovým napětím (ve směru normály), které zvyšuje odolnost proti porušení. Tuto skutečnost není možné pomocí zkoušky dle Nakajimy hodnotit.

3.2.1 Nelineární deformační dráha

Je známo, že nelineární dráha deformace může významně ovlivnit skutečnou tvářitelnost materiálu. Tzv. levá dráha, kdy dochází nejprve k jednoosému zatěžování a následně přechází do dvouosého, vede ke zlepšení tvářitelnost materiálu (zelená křivka). Proti tomu tzv. pravá dráha, kdy je materiál po dvouosém zatěžování zatěžován jednoose, vede k významně snížené tvářitelnosti (červená křivka). Toto chování je schematicky znázorněno na obrázku 3-4. [58]



Obrázek 3-4, Vliv deformační dráhy na polohu křivky FLC [59]

Pro popis zmíněného chování lze odlišit přístupy teoretické [20, 60, 61] a experimentální [59, 62, 63]. S ohledem na využití softwaru AutoForm v praktické části práce, je blíže vysvětlen využívaný model GFLC (*Generalized Forming Limit Curve*). Tento model je založen na sérii dvou krokových experimentů tvářitelnosti, které pokrývají celou škálu nelineárních deformací i nejběžnější třídy ocelí. Model je nezávislý na zvoleném materiálovém modelu a v případě lineární deformace je využita původní FLC. [59]

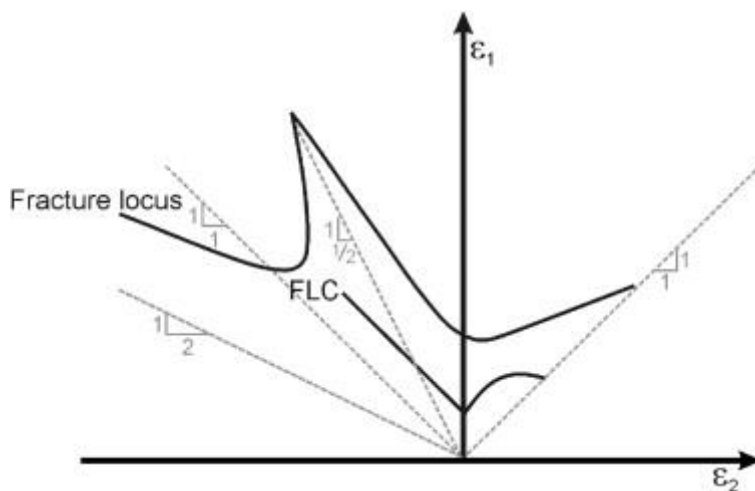
3.2.2 Model porušení Hosford-Coulomb

Model Hosford-Coulomb (HC) navržený Mohrem a Macardetem [64] je schopen hodnotit stavy, které nejsou vyjádřeny křivkou FLC a zohledňují: vliv tlakových napětí při ohýbání, významnou smykovou deformaci, porušení na hraně a kompresi ve směru tloušťky plechu. Nejběžnější rovnice pro tento model (3-4) je uvedena v takzvaném Haigh-Westergaardově smíšeném napětí-ově-deformačním prostoru $\bar{\epsilon}_f(\eta, \theta)$,

$$\bar{\epsilon}_f(\eta, \theta) = b(1 + c)^{\frac{1}{n}} \left\{ \left[\frac{1}{2} ((f_1 - f_2)^a + (f_2 - f_3)^a + (f_1 - f_3)^a) \right]^{\frac{1}{a}} + c(2\eta + f_1 + f_3) \right\}^{-\frac{1}{n}} \quad (3-4)$$

$$f_1 = \frac{2}{3} \cos\left(\frac{\pi}{6}(1 - \theta)\right), f_2 = \frac{2}{3} \cos\left(\frac{\pi}{6}(3 + \theta)\right), f_3 = -\frac{2}{3} \cos\left(\frac{\pi}{6}(1 + \theta)\right) \quad (3-5)$$

kde η značí „stress triaxility“, θ je „Lode angle parameter“ a $\bar{\epsilon}_f$ hodnota deformace při porušení. Stanovení materiálových konstant a, b, c, n je popsáno v [65]. Hranice porušení je v Haigh-Westergaardově prostoru popsáno plochou. Za předpokladu rovinné napjatosti, může být porušení reprezentováno v diagramu FLD (hlavní a vedlejší deformace), viz obrázek 3-5.



Obrázek 3-5, Křivka porušení materiálu (Fracture locus) [66]

4 Oceli využívané pro výrobu pohledových dílů karoserie

Pro plošné tváření jsou využívány materiály dodávané v podobě plechů a pásů. Materiály musí vzhledem k jejich zpracování vykazovat dobrou tvářitelnost i svařitelnost. V souvislosti s experimentální částí disertační práce jsou blíže popsány pouze vybrané skupiny materiálů používané pro výrobu pohledových dílů automobilové karoserie. [2]

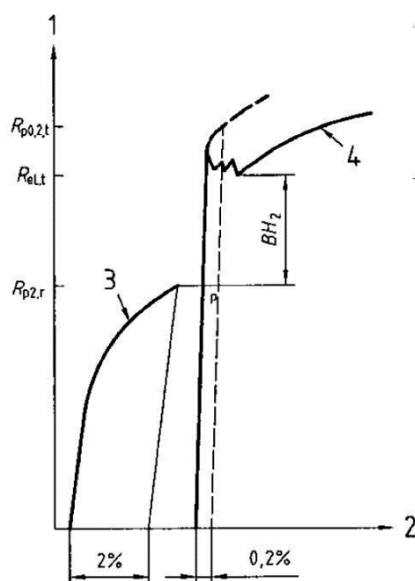
4.1 IF oceli

Charakteristickým znakem IF oceli (Interstitials Free) je velmi nízký obsah intersticiálně rozpuštěného uhlíku a dusíku (≤ 50 ppm). Dosažení takto nízkých hodnot je možné pomocí metody VD (angl. vacuum degassing) během tavby a současně přidáním titanu nebo niobu (max. 0,30 hm%), což vede i ke vzniku stabilních karbonitridů. Předností této skupiny ocelí je především výborná tvářitelnost, která umožňuje výrobu tvarově složitých výlisků v současnosti zpravidla pohledových dílů automobilové karoserie. Tato skupina ocelí s ohledem na výborné tvářecí vlastnosti v současnosti nahradila plechy uklidněné hliníkem. [1, 67]

4.2 Bake Hardening oceli

Hlubokotažné materiály s BH efektem (Bake Hardening) jsou využívány za účelem kompenzace nedostatečné míry deformace a tím i nevyhovující tuhosti u vybraných dílů karoserie. Typickými zastupiteli dílů jsou střecha a kapota automobilu. Tato skupina ocelí je schopna poskytnout dostatečnou tažnost během procesu lisování a dodatečně dosáhnout vyšších mechanických vlastností během procesu vypalování povrchového laku karoserie (např. 170 °C, doba dosažení teploty 7 minut, doba výdrže 20 minut). Principem nárůstu meze kluzu je blokování pohybu dislokací pomocí zpětné difúze především atomů uhlíku nebo dusíku. Tím může dojít ke zvýšení meze kluzu o 30 až 80 MPa. Protože změna mechanických vlastností probíhá značně zpomaleně i při pokojové teplotě, je skladovatelnost této oceli omezená. [67]

Přírůstek meze kluzu vyvolaný tepelným zpracováním (index Bake-Hardening), značený jako BH_2 (tj. odpovídající 2% předběžné plastické deformace), a způsob jejího měření je uveden na obrázku 4-1.



Legenda

- | | |
|-------------|--|
| 1 Napětí | 3 Aplikace předběžné 2 % plastické deformace |
| 2 Deformace | 4 Tahová zkouška shodného zkušebního tělesa po tepelném zpracování |

Obrázek 4-1, Stanovení přírůstku BH_2 dle ČSN EN 10325:2007 [68]

4.3 DP oceli

Struktura dvoufázových ocelí (Dual Phase, DP) se skládá z tažné feritické matrice a tvrdé martenzitické fáze. Jedná se zpravidla o nízkouhlíkové oceli s 10–40 % podílem martenzitu, který je ve struktuře obsažen ve formě rozptýlených ostrůvků. Díky vysokým pevnostním vlastnostem, dobré tažnosti a přijatelné ceně je tento materiál značně využíván v automobilovém průmyslu, především pro výrobu vnitřních pevnostních dílů. [69]

Zmíněná mikrostruktura umožňuje dosažení hodnot meze pevnosti v rozsahu cca 400–1200 MPa. Dvoufázové oceli vykazují, v porovnání s ostatními vysoko-pevnými materiály, několik výhod. Hodnota meze pevnosti přímo vyplývá z množství martenzitu obsaženého ve struktuře a je tedy možné tuto hodnotu upravovat. Oceli nevykazují výraznou mez kluzu a mají dobrý poměr meze kluzu a meze pevnosti. Hodnota exponentu deformačního zpevnění je vysoká, a to především do 6 % plastické deformace. Oceli mohou být zároveň vytvrzovány díky BH efektu. V případě nízkého obsahu uhlíku navíc výtečně odolávají šíření únavových trhlin při napětí blízkých mezi únavy. [70]

Legující prvky

Uhlík, obsažený v množství 0,06-0,15 hm%, účinkuje jako stabilizátor austenitu, zpevňuje martenzit a určuje distribuci fází. Mangan, obsažený v rozsahu 1,5-3 hm%, také účinkuje jako stabilizátor austenitu, zpevňuje ferit a brzdí jeho deformace. Křemík podporuje feritickou přeměnu, zatímco Cr a Mo, v obsahu do 0,4 hm%, odkládá perlitickou a bainitickou přeměnu. Mikrolegující prvky V a Nb navíc podporují precipitaci a zjemňují strukturu. [71]

Výroba DP ocelí

Ploché výrobky z DP oceli jsou zpravidla vyráběny řízeným ochlazováním austenitické fáze. Strukturu je také možné získat z feriticko-austenitické struktury díky inter-kritickému žíhání. Během žíhání dochází k částečné přeměně austenitu na ferit, načež je zbytek austenitu rychlým ochlazením přeměněn na martenzit. [71]

Zpevnění a tvářitelnost DP ocelí

Struktura oceli nemá dobré předpoklady pro použití vyžadující vysokou tvářitelnost. DP oceli zpravidla vykazují zhoršené výsledky při zkoušce rozšiřování otvoru. Zlepšení je možné dosáhnout přidáním titanu, který zpevní feritickou fází a tím zmírní pevnostní rozdíly jednotlivých fází. Efektivním řešením pro zvýšení pevnosti oceli je zjemňování struktury, které je zároveň možné bez navyšování nákladů na legování. [71, 72]

Vliv zjemnění na deformační a lomovou charakteristiku

Závislost plastických a lomových vlastností DP oceli na velikost zrna byla sledována u ocelí se stejným podílem martenzitické fáze (cca 30%). Rozdílná velikost zrna (12,4 μm , 2,4 μm a 1,2 μm) byla docílena rozdílnou mírou deformace při různých teplotách. Výsledkem zjemnění struktury je dosažení vyšší meze kluzu i meze pevnosti, přestože tažnost není výrazně snížena. Vysvětlením může být nárůst exponentu deformačního zpevnění na počátku plastické deformace. Následkem zjemnění je zároveň zlepšení plastických vlastností martenzitu a kohezní soudržnosti fází. Vyplývající zlepšení plastických vlastností tudíž umožňuje využití této skupiny oceli i pro lisování pohledových dílů karoserie. [67, 73]

Vzhledem ke skutečnosti, že experimentální práce je orientována na automobilový průmysl, jsou v tabulce 4-1 uvedeny příklady mechanických hodnot dle normy VDA 239-100, na jejímž základě jsou dodávány materiály do společnosti ŠKODA AUTO, a. s. Příklad byl vybrán s ohledem na skutečnost, že se ŠKODA AUTO řadí mezi nejvýznamnější výrobce automobilů (a karosářských výlisků) v České republice. V tabulce 4-2 a 4-3 jsou uvedeny ekvivalenty těchto materiálů a jejich povlaků definovaných v příslušných ČSN EN normách. Uvedené jakosti jsou dále využity v experimentální části práce.

Tabulka 4-1. Mechanické vlastnosti vybraných hlubokotažných ocelí, dle VDA 239-100 [74]

Třída oceli dle VDA 239-100	Mechanické vlastnosti				
	Mez kluzu	Mez pevnosti	Celková tažnost	Součinitel plastické anizotropie	Exponent deformačního zpevnění
	$R_{p0,2}$	R_m	$A_{80\text{ mm}}$	$r_{m/20}$	$n_{10-20/Ag}$
	[MPa]	[MPa]	[%]	[-]	[-]
CR4	110÷170	260÷330	≥ 41	≥ 1,8	≥ 0,22
CR180BH	180÷240	290÷370	≥ 34	≥ 1,3	≥ 0,17
CR210BH	210÷270	320÷400	≥ 31	≥ 1,2	≥ 0,16
CR290Y490T-DP (DP500)	290÷380	490÷600	≥ 24	-, (≈1,0)	≥ 0,15

Tabulka 4-2, Ekvivalent ocelí, dle VDA 239-100 / ČSN EN*

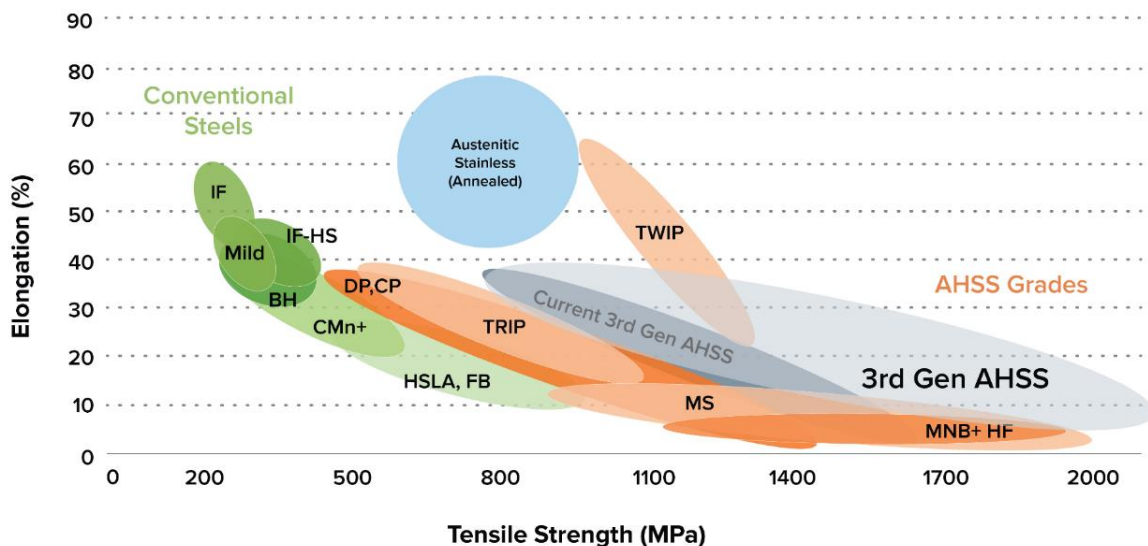
Třída oceli dle VDA 239-100	Třída oceli dle normy ČSN EN*		Obecné označení
CR4	ČSN EN 10152	DC05	-
CR4	ČSN EN 10327	DX56D	-
CR180BH	ČSN EN 10268	HX180BD	-
CR210BH	ČSN EN 10268	HX220BD	-
CR290Y490T-DP (DP500)	ČSN EN 10336	HCT500X	DP500

Tabulka 4-3, Značení povlaku, dle VDA 239-100 / ČSN EN*

Značení povlaku dle VDA 239-100	Značení povlaku dle normy ČSN EN	Tloušťka na každé straně [μm]	Typ povlaku
EG29/29	ZE50/50	4,1÷6,9	Elektrolyticky pozinkovaný
EG47/47	ZE75/75	6,0÷8,6	
GI40/40	Z100	5,0÷8,5	Žárově pozinkovaný
GI60/60	Z140	8,5÷13	

4.4 Budoucí vývoj AHSS ocelí

Vývoj AHSS ocelí je v literatuře zpravidla řazen do tří generací. V praxi i vědeckých publikacích je rozdíl mezi těmito skupinami charakterizován pomocí tzv. „Global Formability Diagram“ a to navzdory skutečnosti, že tato vizualizace nevypovídá o odolnosti proti vzniku trhlin na hranách nebo o odolnosti proti vzniku povrchových trhlin při ohybu.



Obrázek 4-2, GFD diagram s vyznačením předpokládané oblasti 3. generace AHSS ocelí [75]

První generaci AHSS ocelí charakterizuje feritická matrice zajišťující tažnost, která je doplněna různým množstvím dalších fází jako martenzitem, bainitem a zbytkovým austenitem, které propůjčují oceli vyšší pevnost při zachování potřebné tažnosti (skupiny ocelí vyznačené oranžovou barvou na obrázku 4-4).

Znakem druhé generace ocelí je austenitická struktura, která díky mechanismu dvojčatění propůjčuje těmto ocelím vynikající tažnost v kombinaci s vysokou pevností. Z důvodu potřeby značného množství legujících prvků a komplexního válcovacího procesu je výroba ocelí z této skupiny finančně náročná, a v kombinaci s technologicky náročným svařováním, nenašla tato skupina široké využití v automobilovém průmyslu.

Cílem třetí generace AHSS ocelí je dosažení vysoké pevnosti při zachování dostatečné tažnosti. Důraz je kladen na nízkou cenu i podmínku snadného a bezproblémového spojování dílů z těchto ocelí. [76, 77]

3. generaci AHSS ocelí lze dále dělit na:

- TRIP-Assisted Bainitic Ferrite (TBF) and Carbide-Free Bainite (CFB)
- Quenched and Partitioned Grades, Q&P
- Medium Manganese Steels, Medium-Mn (nebo Med-Mn)

S ohledem na příznivý poměr pevnosti a tažnosti oceli lze předpokládat, že třetí generace ocelí může být využita i pro výrobu vnějších dílů karoserie a tím povede ke snížení hmotnosti vozu. Hodnocení lisovatelnosti je diskutováno v [76, 78-80]. Literatura uvádí zlepšení tváritelnost především v oblasti homogenní deformace.

V tabulce 4-4 je uvedeno zastoupení kategorií ocelí (klasifikovaných dle meze kluzu) pro jednotlivé generace vozu ŠKODA OCTAVIA. Z hlediska materiálového mixu lze pozorovat významný nárůst použití vysokopevnostních ocelí, za tepla lisovaných vysokopevnostních ocelí a současně pokles využití hlubokotažné oceli s mezí kluzu do 200 MPa.

Tabulka 4-4, Příklad, procentuální zastoupení dílů karoserie s ohledem na kategorii ocelí [27, 81]

Generace ŠKODA OCTAVIA (Vyráběno v letech)					
Kategorie oceli	Mez kluzu [MPa]	I. (1996-2010)	II. (2004-2012)	III. (2013-2020)	IV. (2020-současnost)
Hlubotažná ocel (LSS)	≤ 200	77 %	26 %	21 %	20 %
Vysokopevnostní ocel (HSS)	200-400	8 %	45 %	34 %	33 %
Pokročilá vysokopevnostní ocel (AHSS)	400-700	12 %	11 %	16 %	16 %
Ultra vysokopevnostní ocel (UHSS)	700-1000	3 %	12 %	3 %	3 %
Vysokopevnostní za tepla tvářená ocel (PHS)	1000-1200	0 %	6 %	26 %	28 %

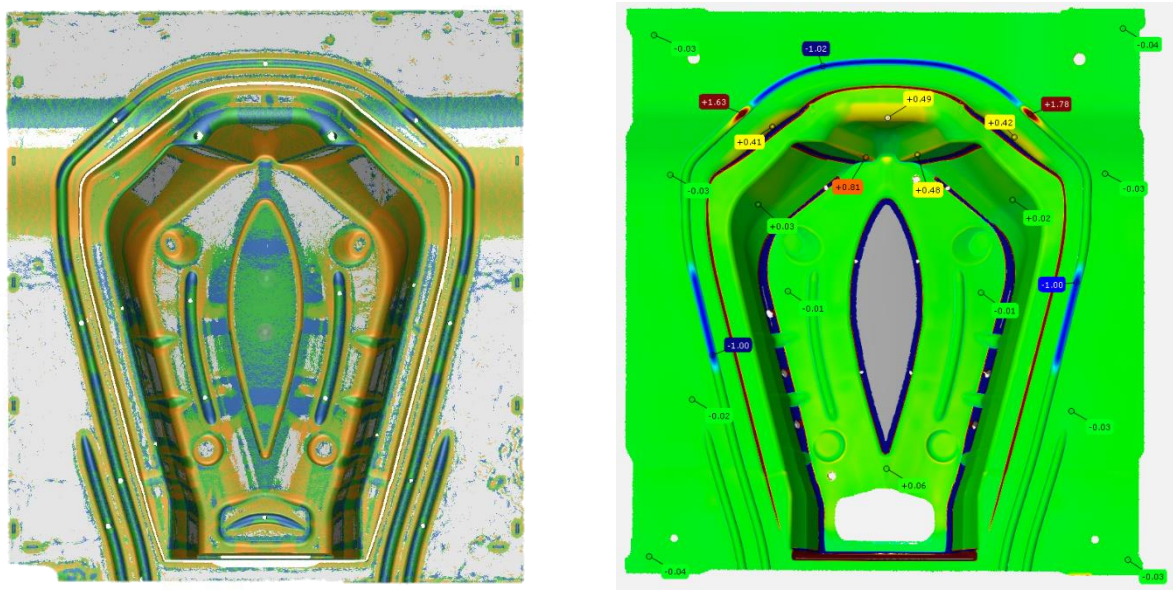
5 Podpora tvářecího procesu

5.1 Fotogrammetrie

Častou metodou při vývoji a výrobě produktů je použití numerických simulací a virtuálních prototypů či celých sestav. Za předpokladu dostatečných znalostí okrajových podmínek je možné předpokládat chování těchto systémů bez časově a finančně náročné výroby fyzických dílů. Pro ověření přesnosti virtuálních metod je ovšem nutná validace výsledků s reálnými zkouškami. Správnost metodiky je zpravidla ověřována na jednodušších úlohách, u kterých jsou již experimentální výsledky známy, nebo na experimentech realizovaných ve více variantách. Pro tyto účely slouží řada měřicích systémů, využívajících dotykových i bezkontaktních senzorů. Nevýhodou fyzických senzorů je zpravidla časová a prostorová náročnost měření. Tyto nedostatky mohou být často odstraněny využitím bezkontaktních měřicích systémů využívajících principů fotogrammetrie. Pojmem fotogrammetrie se rozumí metoda, díky které je možné získat informace o tvaru a poloze objektu zachyceném na snímku. [82-85]

5.1.1 3D skenery

Předností 3D skenerů je schopnost získání digitální podoby sledovaného objektu, které je možné porovnávat s CAD daty. Skenováním lisovacích nástrojů lze získat reálné tvary produkčních nástrojů s přesností v řádu 0,01 mm a sledovat tak např. postup tvarového zpracování nových nástrojů. Příklad využití těchto systémů pro digitalizaci lisovacích nástrojů je uveden na obrázku 5-1. [85]

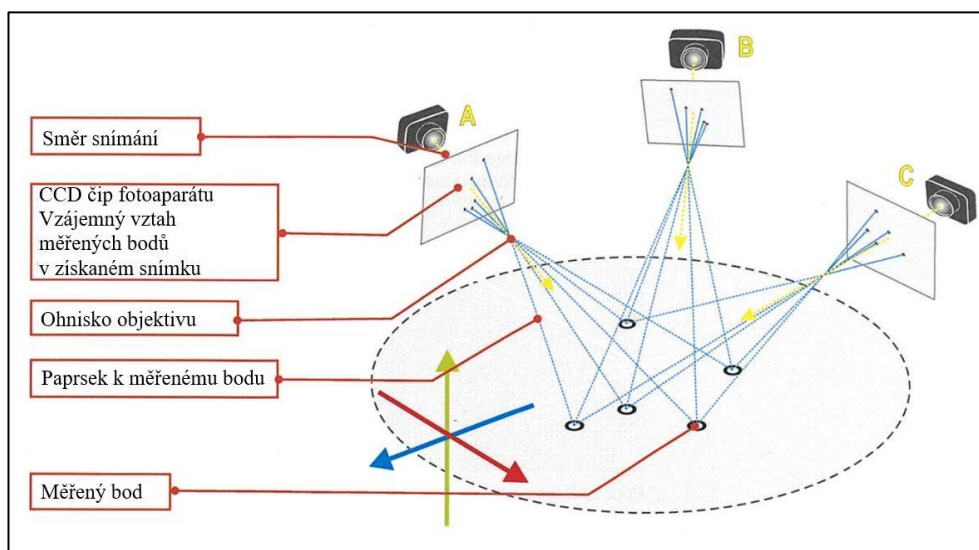


Obrázek 5-1, příklad skenu lisovacího nástroje, průběh křivosti (vlevo), odchylky rozměrů (vpravo)

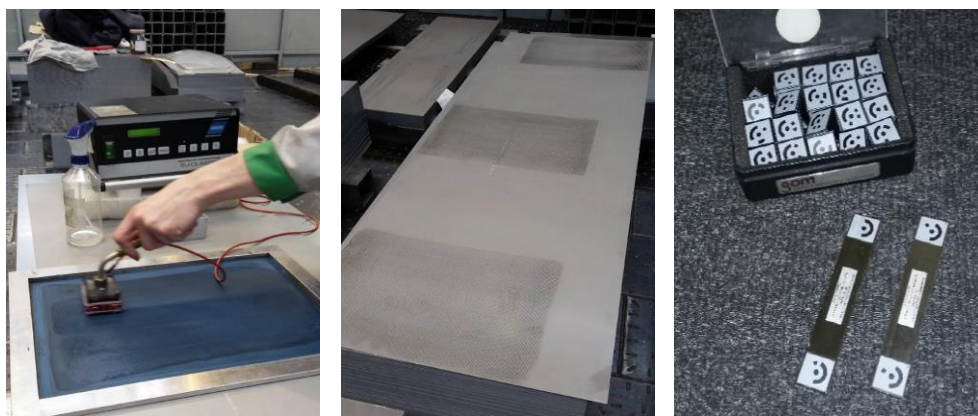
5.1.2 Systém ARGUS

Principem systému je hodnocení deformací založené na laterální distorzi povrchového rastru (GSA), který je na povrch plechu zpravidla nanesen pomocí elektrochemického leptání nebo pomocí laseru. Je nutné, aby rastr přečkal proces tváření, vykazoval vůči původnímu materiálu dostatečný kontrast a bylo tudíž možné následné měření. Rastr je deformován současně s povrchem dílu. Výsledný tvar rastru je zachycen CCD čipem z několika úhlů, viz obrázek 5-2. Měřením je možné určit popis polohy bodů rastru v prostoru. Měření mohou být díly s velikostí od 100 mm do několika metrů, rozsah měřené deformace se pohybuje od 0,5 % do stovek %. [86]

Na základě znalosti rozměrů rastru před tvářením dílu, je tudíž systém schopen analyzovat míru deformace dílu a tím i validovat rozdíly mezi numerickou simulací a reálnou součástí. Výstupy ze systému jsou využity v experimentální části této práce, příklad nanesení rastru je uveden na obrázku 5-3. S ohledem na přesnost a rychlost vyhodnocení pomocí systému ARGUS a jeho rozsáhlé nasazení v automobilovém průmyslu [87-89], je právě tento systém využíván v experimentální části disertační práce.



Obrázek 5-2, Princip měření, systém ARGUS [86]



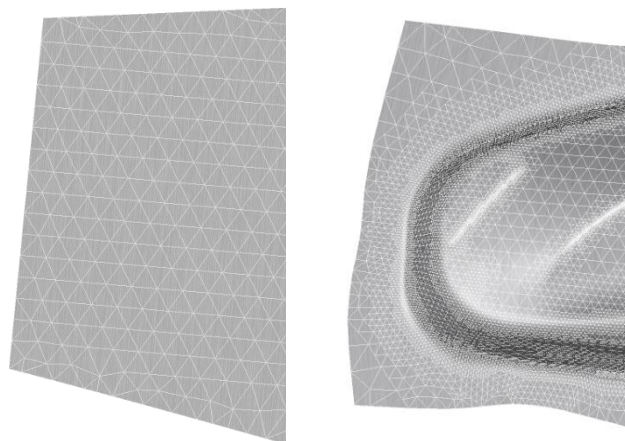
Obrázek 5-3, Měření pomocí systému ARGUS, nanesení rastru na plech a měřicí artefakty

5.2 Numerické simulace v plošném tváření

Numerické simulace využívající metody konečných prvků (MKP) jsou v současnosti nejběžnějším nástrojem pro predikci deformace a napětí v průběhu plošného tváření. Na jejich základě je možné hodnotit vznik porušení materiálu, míru odpružení i další vady související s výrobou výlisků. Principem MKP je diskretizace na elementy spojené pomocí uzlů. Počátky této metody se datují do 50. let 20. století. S rozvojem výpočetní techniky se tato metoda rozšířila do prakticky všech oblastí strojírenství. Klíčovým faktorem pro přesnost a efektivitu numerické simulace je správný výběr řešiče, typu elementů (plošné/objemové), korektní definice procesu a okrajových podmínek. [17, 90]

Mezi aktuálně rozšířené softwary se řadí ANSYS, DEFORM, LS-DYNA (ANSYS), PAM-STAMP (ESI GROUP), Simufact Forming (HEXAGON) a AutoForm Forming. Cílem mnoha vývojářů SW pro plošné tváření je společně s numerickým řešením nabízet i asistenci při návrhu lisovacích nástrojů, hodnocení stability lisovacího procesu nebo nástrojů pro virtuální auditové hodnocení výlisků.

K řešení fyzického problému v numerické simulaci je možné využít různé typy elementů. V oblasti plošného tváření se lze setkat nejčastěji s membránovými (*angl. membrane*) a skořepinovými (*angl. shell*) elementy. S ohledem na nižší složitost výpočtu (nižší výpočetní čas) je pro predikci porušení materiálu možné využívat membránové elementy. Pro hodnocení např. odpružení plechu je ale nutné využít skořepinové elementy, které zohledňují i ohybové napětí. [90, 91] Dílčí okrajové podmínky ovlivňující výsledek numerické simulace jsou diskutovány v kapitole 7. Příklad adaptivního síťování [92, 93], které významně napomáhá ke zrychlení výpočetního času úloh (související s plošným tvářením) je uveden na obrázku 5-4.



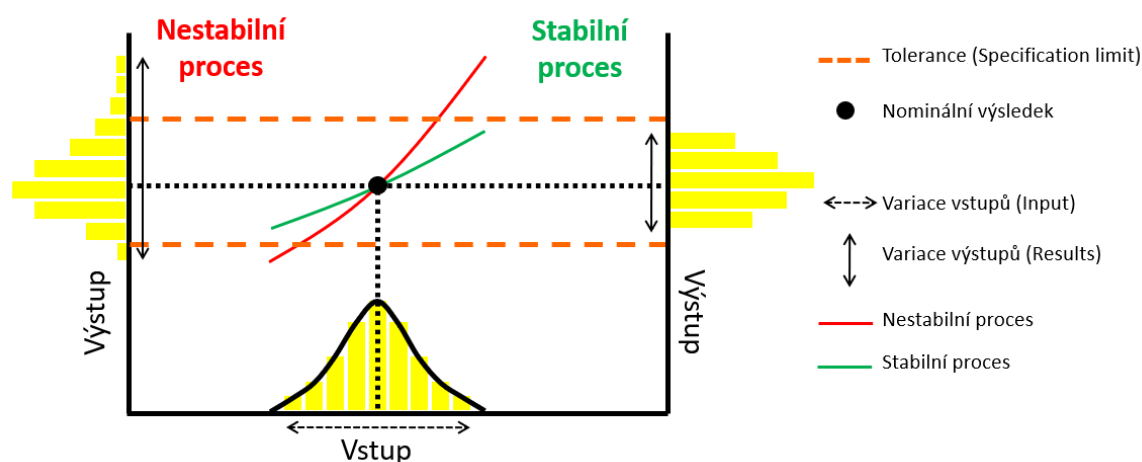
Obrázek 5-4, ukázka MKP sítě, adaptivní síťování

V oblastech, kde dochází k ohybu plechu (a tím i k nárůstu normálové vzdálenosti mezi elementem a nástrojem) je síť zjemněna tak, aby lépe reprezentovala napětí a tvar povrchu plechu.

Pro výpočet numerické simulace je v experimentální části disertační práce využíván software AutoForm Forming. Důvodem pro volbu tohoto softwaru je v porovnání s konkurenčními řešeními krátká doba výpočtu s vysokou přesností numerické simulace. [94, 95, 96]

5.2.1 Robustnost procesu

Před finální validací numerické simulace a uvolněním dat pro výrobu lisovacího nástroje je nutné hodnotit tzv. robustnost lisovacího procesu. S ohledem na toleranci vstupního materiálu (tloušťka plechu, drsnost, mechanické vlastnosti) a nejistotu spojenou např. s velikostí přidržovací síly je nutné analyzovat rozptyl výsledků na základě těchto nejistot. Na obrázku 5-5 je zobrazen princip hodnocení stability procesu, kdy rozptyl výsledků musí být obsažen uvnitř stanoveného tolerančního pole. V opačném případě je nutné modifikovat geometrii tvářeného dílu, upravit metodu lisování dílu nebo zúžit tolerance pro vstupující materiál. [97, 98]



Obrázek 5-5, Rozptyl výsledků s ohledem na nejistoty na vstupu lisovacího procesu [99]

6 Cíle disertační práce

Oceli pro stavbu karoserie prochází významným vývojem. Historicky byly používány oceli hlubokotažné, které se vyznačovaly nízkými hodnotami pevnostních charakteristik (mez kluzu do 200 MPa, mez pevnosti okolo 300 MPa) a relativně vysokými hodnotami plastických charakteristik (u posledních druhů ocelí se pohybují nad 40%). Pevnost celé karoserie byla řešena pomocí zvyšování tloušťky pro vybrané díly.

Na současnou stavbu karoserie měly zásadní vliv ekologické aspekty prezentované „EURO normami“, které předepisují produkci emisí. Splnění limitů bylo dosahováno zvyšováním kvality spalování paliva (účinnost spalovacího procesu), ale také snižováním hmotnosti karoserie automobilu při zachování nebo zvýšení bezpečnostních aspektů. Toto jsou důvody, které vedou výrobce k používání nových materiálů pro stavbu karoserie, kdy zvláště v posledních letech vznikla celá řada nových materiálů, které splňují nároky nutné pro stavbu karoserie.

Benefitem využití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie je snížení hmotnosti karoserie vozu a současně i finanční úspory. Z literární rešerše a současného stavu poznání vyplývá, že navzdory existenci řady publikací týkajících se numerických simulací v plošném tváření a využití vysokopevnostních materiálů, neobsahuje žádná z nich komplexní metodiku pro aplikaci těchto materiálů. Vytvoření metodiky pro nasazení vysokopevnostních ocelí (úzce související s numerickou simulací a hodnocením jejích výsledků) umožní použití nových materiálů pro výrobu panelových dílů karoserie, které je s ohledem na tvarovou složitost dílů komplikované. Z tohoto důvodu si disertační práce klade následující hlavní cíl:

- Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů automobilové karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření

Řešení hlavního cíle práce lze rozdělit na řešení jednotlivých dílčích cílů:

- Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace pro plošné tváření
- Vytvoření kontrolního listu pro numerickou simulaci
- Hodnocení vyrobitelnosti vnějších dílů karoserie z vysokopevnostní oceli pomocí dílčích experimentů
- Ověření navrženého postupu řešení pro vybraný vnější díl karoserie a materiálovou jakost

Úvod k experimentální části práce

Výzkum zaměřený na výlisky z HSS a AHSS materiálů (DP ocelí) se zabývá především tloušťkami plechu vyššími než 1 mm a na díly s jednoduchou geometrií. Vybrané články [11, 100-105] hodnotí ztenčení a odpružení pro díly, které nedosahují složitosti povrchových dílů karoserie.

Dosažení redukce hmotnosti s využitím vysokopevnostních materiálů je možné dosáhnout jen zkoordinováním materiálových vlastností, geometrie dílu a možností výrobního procesu. S nárůstem pevnosti ocelí zpravidla dochází k poklesu hodnoty exponentu deformačního zpevnění (n) v porovnání s konvenčními ocelemi. Nižší hodnota n má za následek ostřejší gradient deformace a dřívější lokalizaci deformace.

Metodický plán a geometrie dílu musí být navržena tak, aby nedocházelo k porušení materiálu z důvodu kritického přetvoření dílu, ke tvorbě zvlnění či jiných auditových závad a díl byl za přijatelnou cenu vyrobitelný.

V praxi lze výlisky vzhledem ke své složitosti dělit do 3 kategorií [1A, 2A]:

Kategorie I. – díly s nejmenší tvarovou složitostí (např. vnější spodní páte 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).

Kategorie II. – díly s větší tvarovou složitostí (vnitřní páte 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).

Kategorie III. – 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.

Disertační práce je vypracována v blízké spolupráci se společností ŠKODA AUTO, a.s. I na základě této spolupráce byl pro ověření navrženého postupu zvolen materiál CR290Y490T-DP (definován v normě VDA 239-100 [74]), který je dále v textu označován jako „DP500“. Vybraný materiál musí být vyvážený z hlediska zpracovatelských i pevnostních vlastností. Společně s dobrou tvářitelností musí vnější díly vykazovat dobrou povrchovou kvalitu, odolnost proti vyboulení i svařitelnost.

Díl HKau se v porovnání s ostatními pohledovými díly vyznačuje relativně nízkou tvarovou i technologickou složitostí. V případě úspěšné aplikace vybrané oceli je předpokládáno její nasazení i pro další vybrané vnější díly. Pojmy „HKau“, „TAV“ a „TAH“ jsou vysvětleny v Seznamu použitých zkratk a symbolů v úvodu práce.

V tabulce 6-1 je uveden typový přehled dílů pro možnou redukci hmotnosti karoserie a úsporu nákladů. Uvedeny jsou pouze veřejně známé výrobní projekty (2020). Úspora v EUR na vůz je založena na cenách uvedených v tabulce 6-2. [27]

Tabulka 6-1, Redukce hmotnosti karoserie s použitím oceli DP500 pro vybrané díly

Díl	Projekt	Materiál	Tloušťka [mm]	Hmotnost dílu [kg]	Δ [kg/vůz]	Δ [EUR/vůz]
HKau	Karoq	DC05	0,70	2,193	-0,313	-0,10*
		DP500	0,60	1,880		
	Octavia IV. Generace	DC05	0,70	2,001	-0,286	-0,09*
		DP500	0,60	1,715		
TAV	Rapid Spaceback	CR180BH	0,65	4,141	-1,148	-0,50*
TAH		DP500	0,60	3,823		
		CR180BH	0,65	3,347		
		DP500	0,60	3,091		

Tabulka 6-2, Cena za kg materiálu (2021/Q1) [27]

Standardní materiál (DC05/CR180BH)	0,80 EUR/kg
DP500 HKau	0,88 EUR/kg
DP500 TAV+TAH	0,83 EUR/kg

V rámci experimentální části práce byly využity materiálové jakosti uvedené v tabulce 4-1. Mechanické vlastnosti použitých šarží a byly ověřeny (v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze, nebo na pracovišti Technického servisu lisoven a svařoven, ŠKODA AUTO) a splňují mechanické vlastnosti předepsané příslušnou normou.

7 Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace

S ohledem na neustále se zvyšující význam numerické simulace v předvýrobní fázi výroby lisovacího nářadí je významným bodem v předkládané metodice právě kontrolní list numerické simulace. Předmětem dílčího cíle „Analýza vlivu okrajových podmínek“ je nalezení klíčových parametrů ovlivňující výsledek numerické simulace v podmínkách plošného tváření za studena.

Mezi klíčové parametry pro numerickou simulaci lze řadit:

- Nastavení výpočetní sítě (kap. 7.1)
- Tribologie (kap.7.2)
- Rychlost deformace (kap. 7.3)
- Hodnocení odpružení (kap. 7.4)
- Definice nástrojů s ohledem na kontaktní oblasti [3A, 4A]
- Materiálová karta [1A, 5A, 6A, 7A]

Pro výpočet numerických simulací uváděných v experimentální části disertační práce byl využit software AutoForm Forming od developerské společnosti AutoForm Engineering GmbH. Tato společnost byla založena v roce 1995 ve Švýcarsku. Tento software, využívající implicitní metodu výpočtu, je jeden z nejrozšířenějších pro využití v automobilovém průmyslu. Využívají ho přední nadnárodní společnosti, jako jsou např. VW, Daimler, Toyota, Volvo, ArcelorMittal, ThyssenKrupp Steel, a mnoho dalších. V České republice tento program využívá např. automobilka ŠKODA AUTO a mnoho nástrojářen.

Platí obecné pravidlo, kdy okrajové podmínky numerické simulace musí být nastaveny s ohledem na skutečné budoucí provedení lisovacího nástroje. Současně by pak i výroba lisovacího nástroje měla korespondovat s podmínkami v numerické simulaci. V případě nesplnění těchto podmínek dochází ke snížení přesnosti numerické simulace.

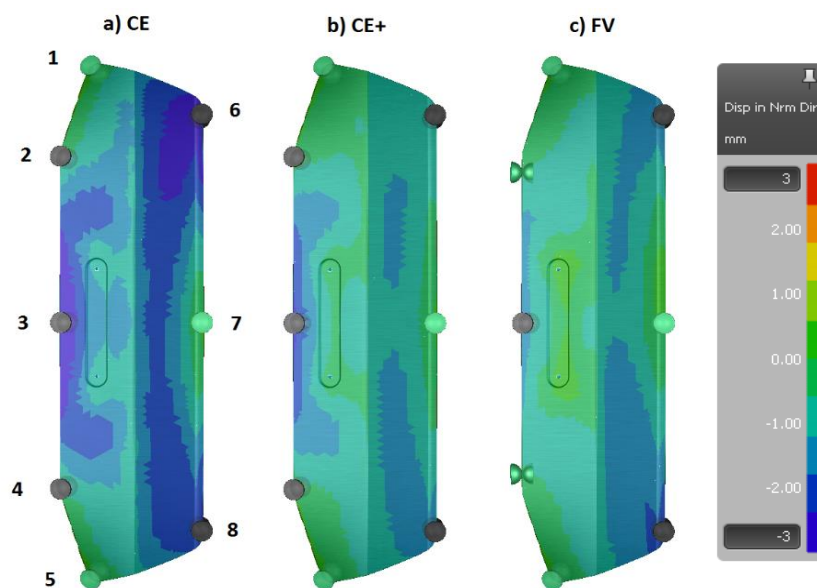
7.1 Nastavení výpočetní sítě

Porovnání vlivu nastavení výpočetní sítě bylo hodnoceno na výlisku SEAT ATECA HKau. Materiálem využívaným pro výrobu je ocel CR5 o výchozí tloušťce 0,65 mm. Nastavení sítě bylo provedeno pro tři výpočetní strategie: CE, CE+ a FV (CE – Concept Evaluation; CE+ – Concept Evaluation +; FV – Final Validation), uvedených v tabulce 7-1.

Tabulka 7-1, Přehled parametrů pro jednotlivá nastavení výpočtu

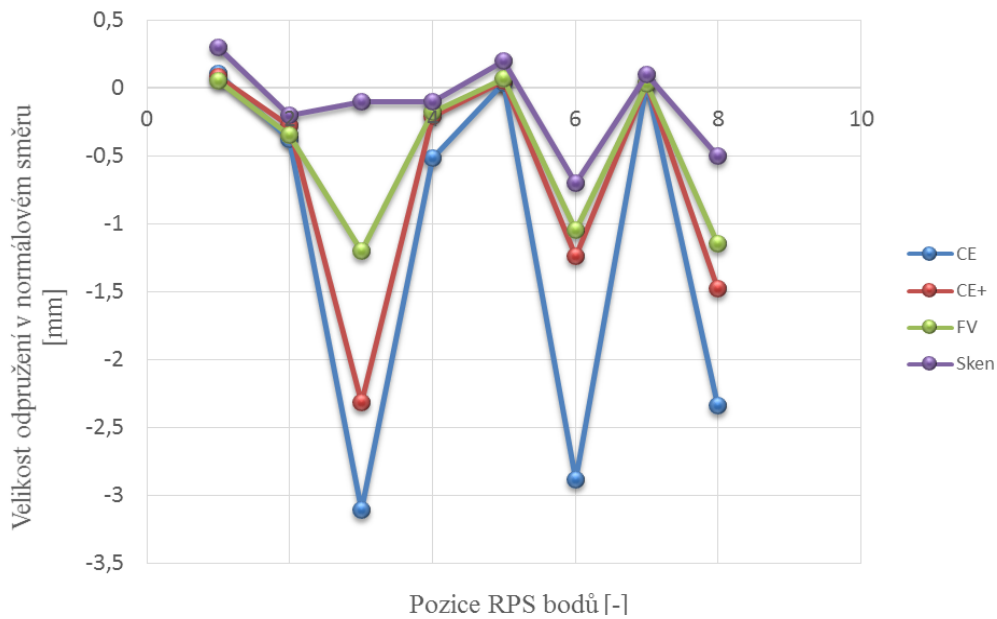
Strategie	CE	CE+	FV
Typ elementu sítě	BEM-5	EPS-5	EPS-11
Zasít'ování a tolerance geometrie			
Vzdálenost stehů sítě [mm]	0,50	0,50	0,50
Tolerance zasít'ování [mm]	0,10	0,05	0,05
Max. délka elementu [mm]	50	30	10
Přesnost výpočtu			
Penetrace hrany [mm]	0,22	0,22	0,22
Max. úhel elementu [°]	30	30	22,5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

Přesnost numerické simulace byla hodnocena pomocí porovnání výsledků s výsledkem odpružení fyzického výlisku. Hodnoty odpružení v normálovém směru společně s označením a pořadím uzavírání RPS bodů je uvedeno na obrázku 7-1.



Obrázek 7-1, Výsledek num. simulace s ohledem na výpočetní strategii; s vyznačenými RPS body [8A]

Významné rozdíly mezi výsledky numerické simulace lze najít především mezi elementy typu „membrane“ (CE) a „shell“ (CE+, FV), viz obrázek 7-2. Výsledky přesnosti odpružení s využitím membránového elementu, spolu s hrubým nastavením sítě, se jeví jako nedostatečné. Strategie „CE“ je vzhledem k nižšímu výpočetnímu času vhodná především v prvotních fázích projektu, které jsou zaměřené na identifikaci kritických oblastí výlisku s ohledem na jeho porušení. Výchozí velikost konečno-prvkové sítě má v tomto případě na výsledek menší vliv než typ použitého elementu. Navzdory nejvyšší kvalitě výpočtu dochází k rozdílu výsledků, a to především v oblasti „3“ a „8“, viz obrázek 7-2. Vyplyvající poznatky odpovídají předpokladu a korespondují se závěry publikovanými v literatuře [8, 9, 107, 108]. Detailní popis experimentu je uveden v publikaci [8A].



Obrázek 7-2, Porovnání změřených hodnot a výsledků num. simulace s ohledem na výp. strategii [8A]

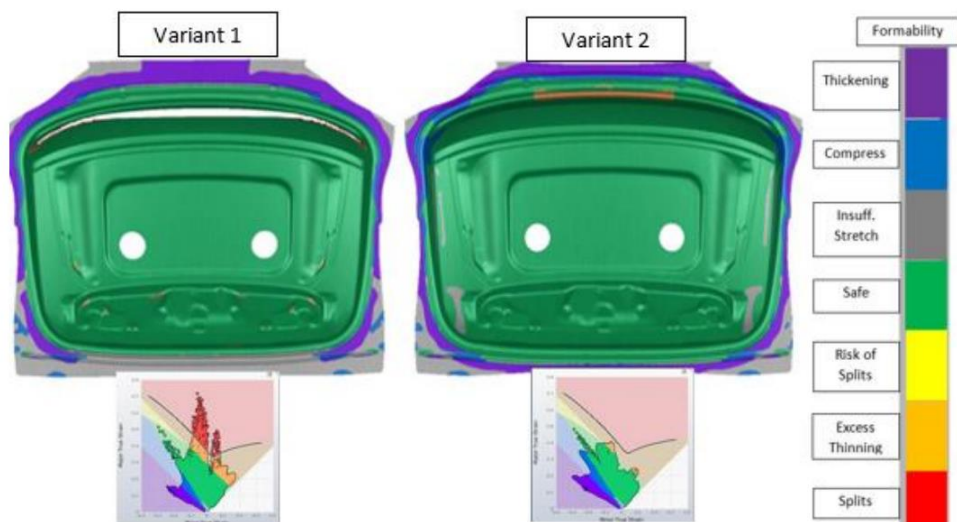
7.2 Tribologie

Faktorem významně ovlivňujícím výsledek numerické simulace je definice okrajových podmínek tření. Literatura [109-113] řadí jako nejvýznamnější parametr (pro numerickou simulaci) závislost koeficientu tření na kontaktním tlaku. Tření plechu významně ovlivňuje hodnotu přetvoření plechu a tím i výsledek odpružení dílu.

V rámci zkoušek bylo provedeno hodnocení pro vnitřní díl pátých dveří u vozu ŠKODA OCTAVIA 4. generace. Varianta 1 využívá pro simulaci konstantní hodnotu koeficientu tření ($\mu = 0,15$), pro variantu 2 je hodnota koeficientu tření závislá na kontaktním tlaku ($\mu = 0,12$; $p_{ref} = 4,0$ MPa; $e = 0,9$). Výpočet platné hodnoty je uveden ve vztahu níže:

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

Simulace využívající konstantní koeficient tření (varianta 1) vykazuje významné porušení v horní části výlisku (již 35 mm před dosažením spodní úvrati beranu). V realitě ale dochází v této oblasti pouze ke zvýšenému namáhání, jak vypovídá simulace využívající koeficient tření závislý na kontaktním tlaku (varianta 2), viz obrázek 7-3. Nástroje použité v numerické simulaci pracují s vymodelovanými brzdícími drážkami na nástrojích. [9A, 10A]

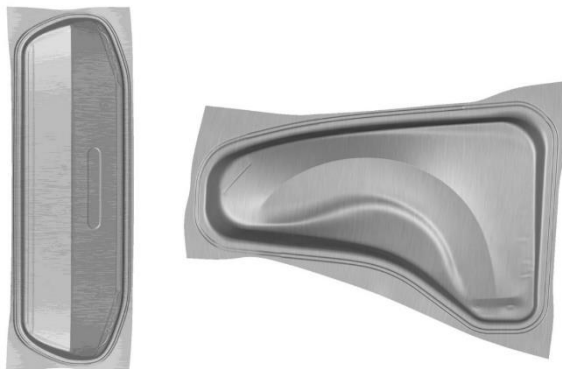


Obrázek 7-3, Porušení výlisku s rozdílným nastavením tření;
vlevo: konstantní hodnota koeficientu tření; vpravo: koeficient tření závislý na kontaktním tlaku [10A]

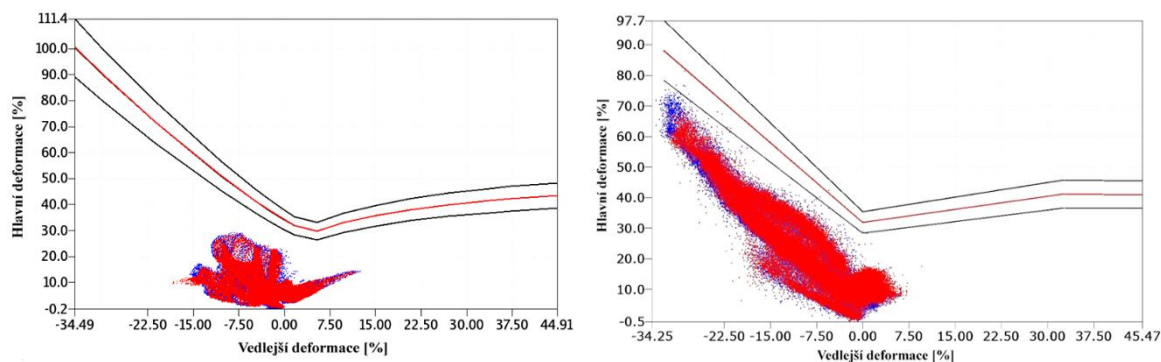
Pokročilé modely tření využitelné pro numerické simulace plošného tváření současně s tlakovou závislostí sledují i závislost koeficientu tření na hodnotě přetvoření materiálu, relativní rychlosti posuvu nástroje a teplotě. [113-116]

7.3 Rychlost deformace

Vliv rychlosti deformace byl hodnocen na dvou vybraných povrchových dílech: SEAT ATECA – páté dveře vnější spodní (HKau) a ŠKODA SUPERB 3. generace – blatník, viz obrázek 7-4. Cílem experimentu je hodnocení nutnosti zohlednění závislosti zpevnění materiálu na lisovacím taktu.



Obrázek 7-4, Sledované výlisky; SEAT ATECA HKau (CR4), ŠKODA SUPERB 3 blatník (CR220BH)

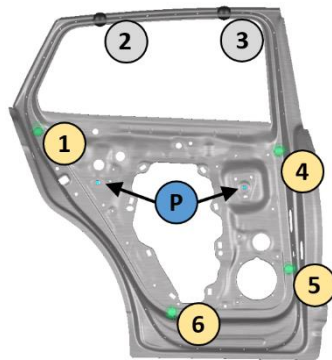


Obrázek 7-5, ARGUS – mračno bodů, SEAT ATECA HKau (vlevo), ŠKODA SUPERB 3 blatník (vpravo); červená barva: lisovací takt = 4 vylisky/min; modrá barva: lisovací takt = 12 vylisků/min [11A]

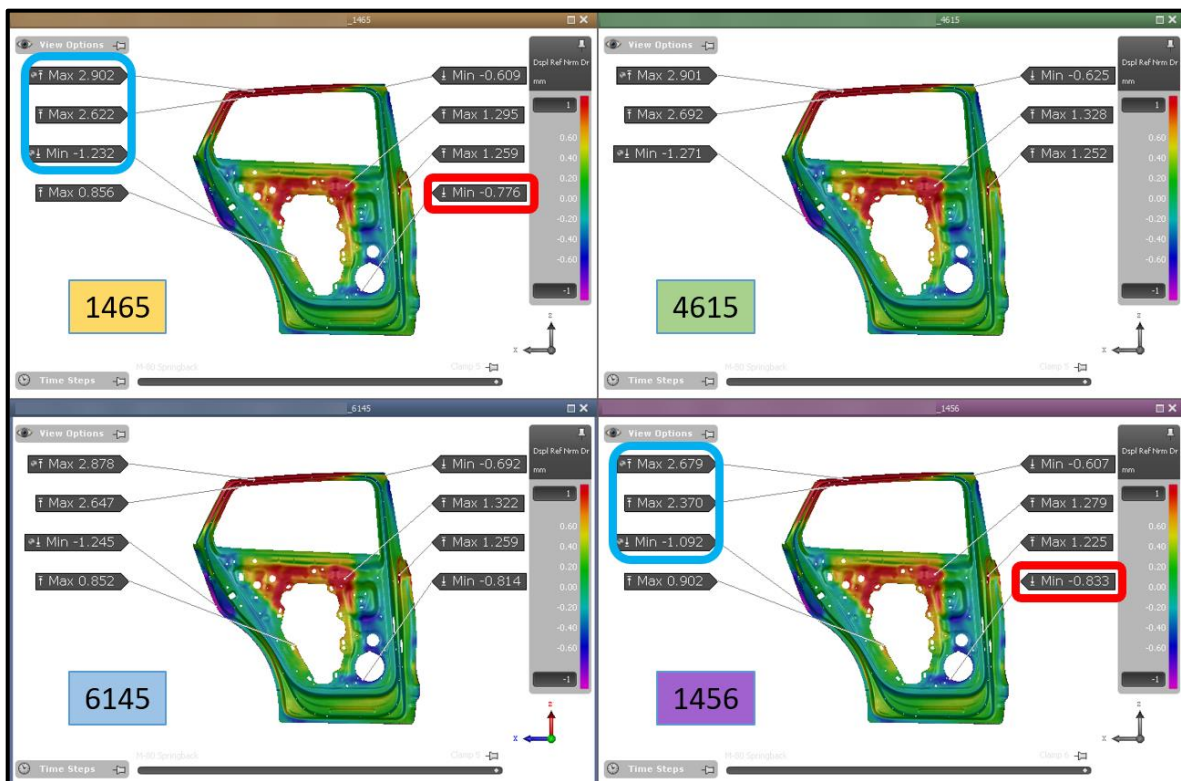
Systémem ARGUS byly sledovány oblasti s nejvyšší mírou přetvoření materiálu. S rostoucí rychlostí lisování dochází k vyšší míře přetvoření dílu. Nejvýraznější změna ztenčení materiálu (kvůli zvýšenému lisovacímu taktu) je do 1,5 % tloušťky, viz obrázek 7-5. S ohledem na získané výsledky není materiálová karta obsahující parametrické křivky zpevnění, odpovídající rozdílné rychlosti deformace (a model tření závislý na relativní rychlosti posuvu mezi plechem a nástrojem), předmětem překládané metodiky. [9A, 11A, 12A, 13A]

7.4 Operace měření odpružení

Zdrojem neshody mezi numerickou simulací a reálným výliskem může být nekorektní postup při hodnocení odpružení. Pro každý díl jsou předepsány středice a měřicí body (RPS), na které je díl ustaven. Pořadí uzavírání v těchto měřicích bodech ovlivňuje hodnocení rozměrovosti součásti. Na obrázku 7-6 je zobrazen vnitřní díl zadních dveří, na kterém jsou písmenem „P“ označeny středice (angl. Pilots) a číslicemi 1 až 6 předepsané měřicí body. Měřicí body 2 a 3 jsou vedeny jako body vedlejší a nebyly při hodnocení odpružení dílu aktivní. Na obrázku 7-7 jsou uvedeny hodnoty odpružení.



Obrázek 7-6, číselné označení RPS bodů (číslo v kruhovém poli)



Obrázek 7-7, Rozdílné výsledky rozměru s ohledem na odlišné pořadí uzavírání RPS bodů

Rozdíly mezi výsledky numerické simulace jsou způsobeny odlišným pořadím při sevření v měřicích bodech. Změny rozměru se s ohledem na výše zmíněné mohou lišit až o 20 %. Numerická simulace by proto vždy měla respektovat pořadí uzavírání bodů v reálném měřicím přípravku. [4A, 14A]

8 Hodnocení výrobitelnosti dílů z vysokopevnostní oceli

Cílem dílčího cíle je hodnocení lisovatelnosti materiálu DP500, ověření vybraných kroků navrhované metodiky a validace dostupných materiálových karet. Pro hodnocení byly vybrány výlisky uvedené v tabulce 8-1.

Tabulka 8-1. přehled experimentu

	Výlisek	Materiál	Tloušťka
		[-]	[mm]
9.1	Rotačně symetrický výlisek	DP500	0,60
		CR180BH	0,65
9.2	Čtyřhranná nádoba s designovou hranou	DP500	0,55
9.3	FABIA III, Dveře vnější zadní	CR180BH	0,65
		DP500	0,60
9.4	RAPID SPACEBACK, páté dveře vnější spodní	CR4	0,70
		DP500	0,60
9.5	OCTAVIA IV, páté dveře vnější spodní	DP500	0,55

Společně s materiálem DP500 byly sledovány i sériově používané materiály. Na základě zkušenosti s běžně využívanými materiály je možné snáze hodnotit přesnost numerické simulace a hodnotících metod pro experimentální materiál. Pořadí experimentů bylo stanoveno a provedeno s ohledem na složitost výlisků: od nejjednoduššího (rotačně symetrický kalíšek) k nejsložitějšímu (páté dveře vnější spodní).

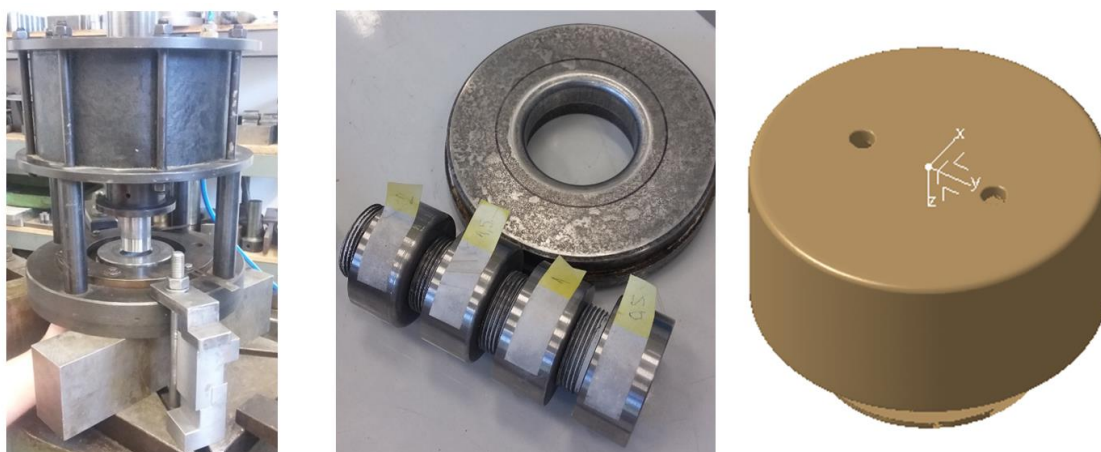
Mechanické vlastnosti sledovaných ocelí byly ověřeny pomocí zkoušky tahem na pracovišti Technického servisu lisoven a svařoven, ŠKODA AUTO. Množství maziva na povrchu plechu bylo ověřeno pomocí zařízení Infralytic NG2. Hodnocení přetvoření bylo realizováno systémem ARGUS 12M (snímáno fotoaparátem Nikon D300s s pevnou ohniskovou vzdáleností) a pomocí konfokálního mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000.

8.1 Rotačně symetrický výlisek

Tvarově nejjednodušším výliskem, který byl sledován, je rotačně symetrický výlisek (kalíšek) s vnitřním průměrem dna 44,7 mm. Zpracovány byly oceli DP500 (tloušťka 0,60 mm) a CR180BH (tloušťka 0,65 mm). Nástrojem pro validaci materiálu a příslušné materiálové karty bylo srovnání výsledků numerické simulace (realizováno v softwaru AutoForm R6), analýzy deformace bezkontaktním optickým systémem ARGUS 12M a měření tloušťky konfokálním mikroskopem OLYMPUS LEXT OLS 3000 na metalografickém výbrusu zhotoveném v ose kalíšku.

V rámci numerické simulace byla použita CAD data vycházející z naskenované geometrie fyzických lisovacích nástrojů. V rámci experimentu byly využity tažníky s rozdílnou hodnotou poloměru ve dně kalíšku (0,5 mm; 1,5 mm a 2,0 mm). Lisovací nástroj společně se skenem povrchu tažníku je uveden na obrázku 8-1. Síla přidržovače je 8,2 kN.

Experiment byl realizován v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze. Materiál pro zkoušky byl poskytnut společností ŠKODA AUTO, a.s.



Obrázek 8-1. Použité nástroje (vlevo a uprostřed), naskenovaný tažník (vpravo)

Tabulka 8-2. Rozměry nástrojů použitých v experimentu

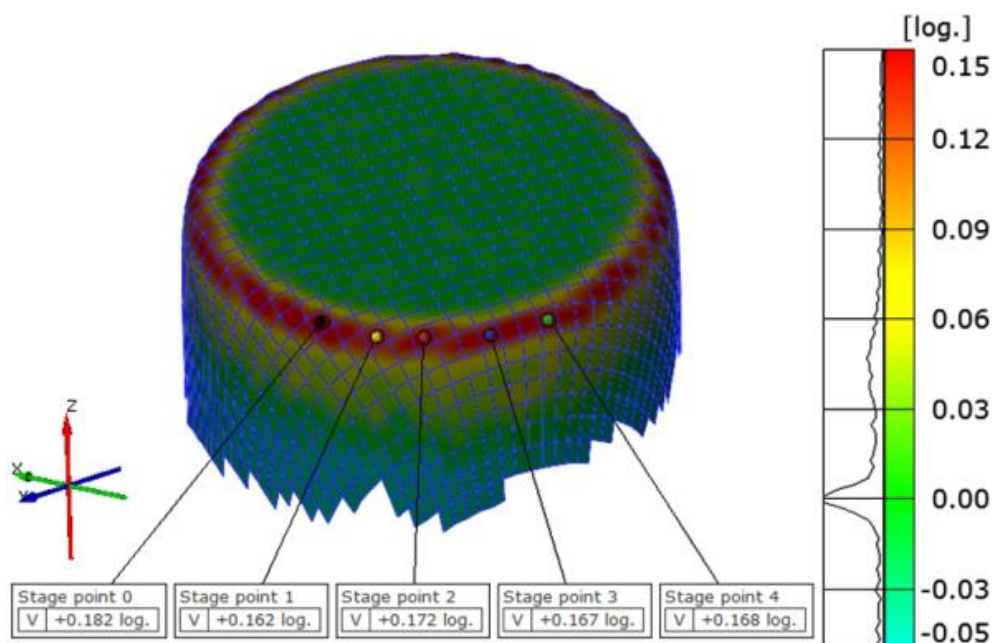
Nástroj	Průměr [mm]		Výška [mm]	Poloměr zaoblení
Tažník	Vnější	44,7	20,0	0,5; 1,5; 2,0
Tažnice	Vnitřní	47,0	14,0	5,5

8.1.1 Měření pomocí systému ARGUS

Na povrch plechu byla po odmaštění elektrochemicky vyleptána deformační síť. Průměr jednotlivých bodů deformační sítě je 1 mm; relativní vzdálenost středů těchto bodů je 2 mm. Po nanesení deformační sítě byly vystřiženy kruhové přístřihy o průměru 78 mm. Relativní vzdálenost jednotlivých bodů deformační sítě a vyplývající ztenčení byly měřeny a vyhodnoceny pomocí systému ARGUS. Vlastnosti měřicího systému jsou uvedeny v tabulce 8-3. Výsledky a obrázky ztenčení v kritických místech kalíšku jsou uvedeny v tabulce 8-4 a na obrázku 8-2. Jako měřený bod byl vybrán střed tažného poloměru.

Tabulka 8-3. Vlastnosti měřicího systému

Typ systému	ARGUS 12M
Fotoaparát	Nikon D300
Rozlišení	4288x2848 pixelů
Čip	26,6 x 15,8mm, CMOS
Snímací čas	1/250 s
Hardware komponenty	Fotoaparát s bleskem, Počítač, Měřicí etalony s referenčními body



Obrázek 8-2., Logaritmicke ztenčení kalíšku získané deformační analýzou ARGUS (DP500; R1,5)

Tabulka 8-4. Procentuální ztečení v kritickém místě kalíšku (ARGUS)

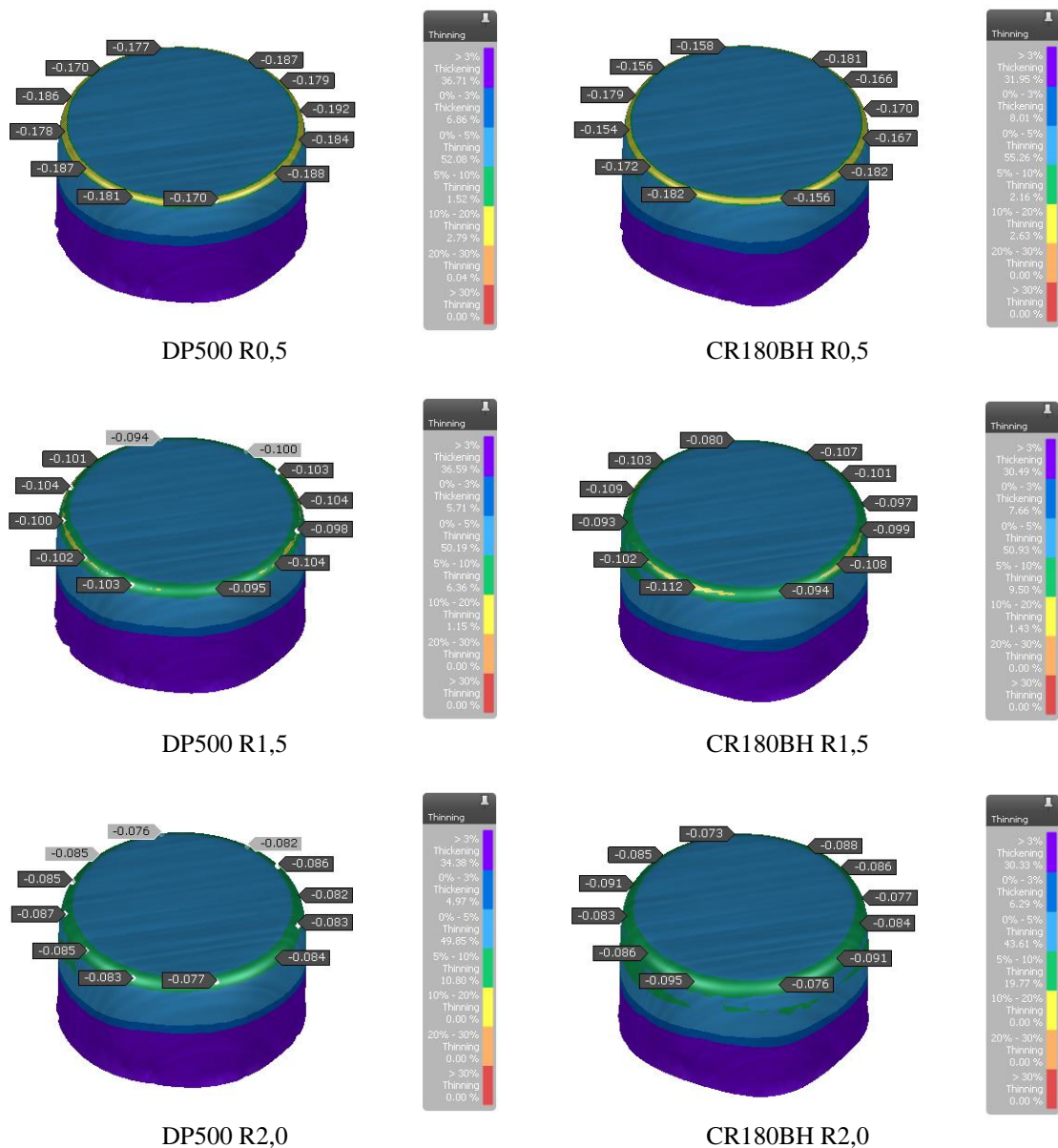
Označení vzorku	DP500 R0,5	DP500 R1,5	DP500 R2,0	CR180BH R0,5	CR180BH R1,5	CR180BH R2,0
Změřené ztenčení [%]	6,7	19,9	6,1	0,6	21,3	11,9
	1,7	17,6	10,5	15,7	21,1	11,1
	18,3	18,8	11,9	12,3	18,1	10,7
	6,6	18,3	5,9	10,0	19,1	15,0
	23,7	18,2	3,4	17,9	19,5	9,9
Ztenčení (průměr) [%]	11,4	18,6	7,6	11,3	19,8	11,8

Na obrázku 8-2. je uveden výstup měření ze systému ARGUS. Pro každý z 6 vzorků bylo vybráno 5 bodů, ze kterých byly odečteny hodnoty ztenčení. S ohledem na skutečnost, že průměr jednotlivých bodů deformační sítě byl 1 mm a hodnoty zaoblení tažníku se pohybují od R0,5 do R2, nebylo možné, aby byl rádius reprezentován více než 1 až 2 body deformační sítě, což se projevuje na výsledcích deformace především u výlisků s nejmenším poloměrem zaoblení.

Na základě této analýzy je vhodné doporučit použití jemnější deformační sítě. Pro dostatečný popis poloměru, a to alespoň 4 body (při využití tažníku R0,5), je nutné využít síť s výchozí relativní vzdáleností bodů blížíící se 0,15 mm. Problematické může být v tomto případě především čtení výsledků pomocí fotoaparátu a měřicích etalonů. Vzhledem k výše zmíněnému nelze pomocí analýzy ARGUS stanovit jednoznačný závěr ohledně zpracovatelnosti oceli DP500 nebo její porovnání s CR180BH.

8.1.2 Numerická simulace

Výpočet je proveden pomocí SW AutoForm Forming R6. Nastavení výpočtu je vyjma snížené velikosti elementu síť plechu (poloviční) a nástroje identické jako nastavení „FV“, uvedené v tabulce 7-1. Výchozí velikost elementu MKP síť byla snížena na hodnotu 2,50 mm, výchozí velikost elementu nástroje byla snížena na hodnotu 1,00 mm. Přidržovací síla v simulaci je 8,2 kN. Výsledky a snímky ztenčení v oblasti rádia jsou uvedeny na obrázku 8-3 a v tabulce 8-5.

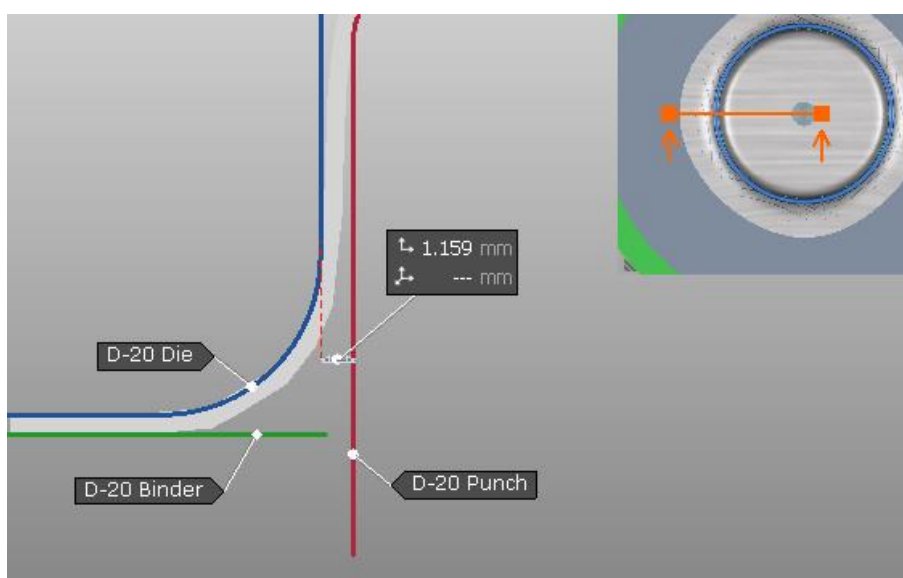


Obrázek 8-3, Numerická simulace, ztenčení plechu v oblasti rádia

Tabulka 8-5, Numerická simulace, výsledek ztenčení pro DP500 a CR180BH

Označení vzorku	DP500 R0,5	DP500 R1,5	DP500 R2,0	CR180BH R0,5	CR180BH R1,5	CR180BH R2,0
Výchozí tloušťka [μm]	600	600	600	680	680	680
Změřené ztenčení [%]	17,7	9,4	8,5	15,8	10,3	8,5
	17,0	10,1	7,6	15,6	9,1	7,6
	18,6	10,4	8,5	17,9	10,9	9,1
	17,8	10,0	8,7	15,4	9,3	8,3
	18,7	10,2	8,5	17,2	10,2	8,6
	18,1	10,3	8,3	18,2	11,2	9,5
	17,0	9,5	7,7	15,6	9,4	7,6
	18,8	10,4	8,4	18,2	10,8	9,1
	18,4	9,8	8,3	16,7	10,1	8,7
	19,2	10,4	8,2	17,0	9,7	7,7
	17,9	10,3	8,6	16,6	10,1	8,6
18,7	10,0	8,2	18,1	10,7	9,1	
Nejnižší hodnota [μm]	17,0	9,4	7,6	15,4	9,1	7,6
Nejvyšší hodnota [μm]	19,2	10,4	8,7	18,2	11,2	9,5
Ztenčení (průměr) [%]	18,2	10,7	8,3	16,9	10,2	8,5

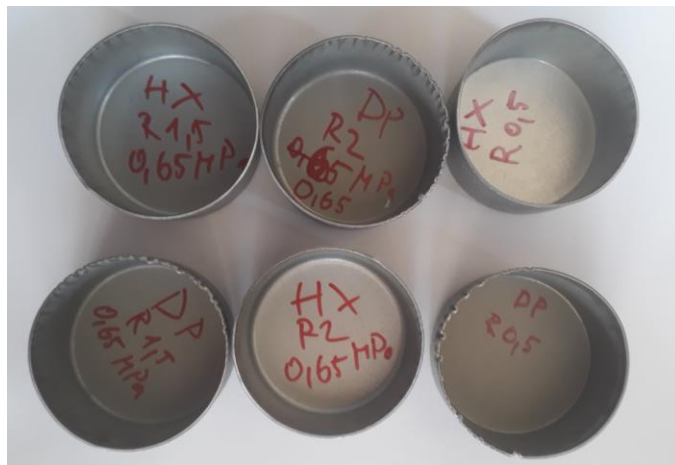
Tažná vůle je větší než 1,15 mm (měřeno na skenované geometrii nástroje) a tudíž větší než nominální tloušťka plechu i tloušťka plechu po napěchování, viz obrázek 8-4.



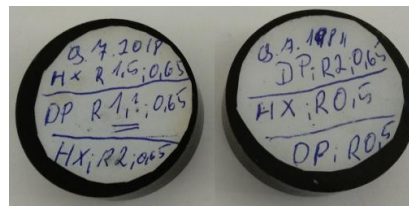
Obrázek 8-4, Velikost tažné vůle v nástroji

8.1.3 Metalografická analýza pro měření tloušťky plechu

Rotačně symetrické výlisky (kalíšky) jsou zobrazeny na obrázku 8-5. Z výlisků byly po rozřezání připraveny vzorky pro metalografický výbrus (viz obr. 8-6. a obr. 8-7)



Obrázek 8-5. Výlisky DP500 a CR180BH



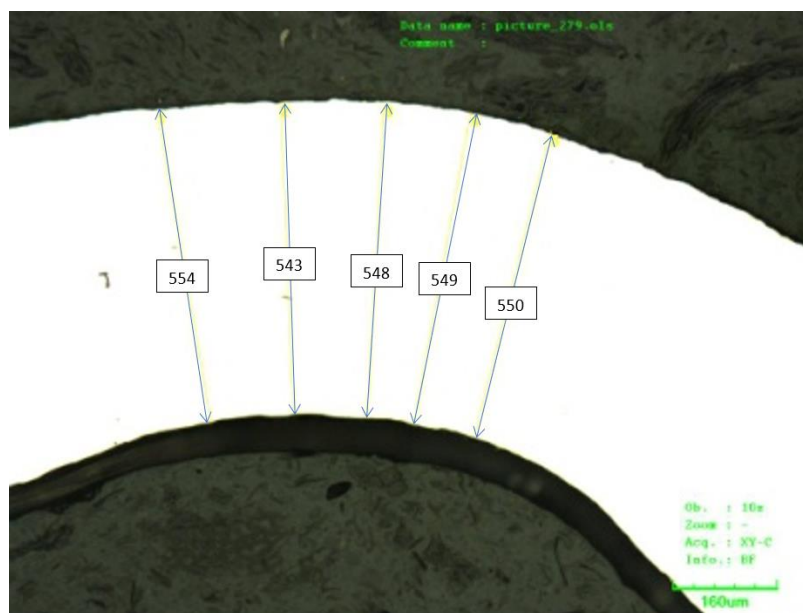
Obrázek 8-6. Značení metalografického výbrusu



Obrázek 8-7. Metalografické výbrusy

Přidržovací síla byla identická pro materiál DP500 i CR180BH a to 8,2 kN. V souvislosti s vyšší hodnotou meze kluzu je potřeba v rámci sériového procesu navýšit sílu přidržovače (a sílu tažnou). U vzorků z oceli DP500 je s ohledem na vyšší pevnost materiálu zjevná tvorba zvlnění ve válcové části výlisku. Tato skutečnost může být překážkou (pokud je nárůst pevnostních vlastností významnější než redukce tloušťky vysokopevnostního materiálu) v případě, kdy je silová kapacita stroje vyčerpána již při použití oceli s nižší pevností než DP500.

Na obrázku 8-8 je uveden příklad měření tloušťky plechu pro vybraný vzorek.



Obrázek 8-8, Zobrazení výbrusu vzorku č. 273 (DP500; R2) na mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000

V tabulce 8-6 je uveden výsledek měření hodnot tloušťky a jeho přepočítání na procentuální ztenčení. Měření tloušťky bylo provedeno na konfokálním mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000.

Tabulka 8-6, Metalografický výbrus pro měření tloušťky plechu, výsledek ztenčení pro DP500 a CR180BH

Označení vzorku	DP500 R0,5	DP500 R1,5	DP500 R2,0	CR180BH R0,5	CR180BH R1,5	CR180BH R2,0
Číslo vzorku	279	267	273	276	264	270
Výchozí tloušťka [μm]	600	600	600	680	680	680
Naměřená tloušťka [μm]	493	530	550	558	603	616
	498	526	548	570	598	620
	496	535	554	553	606	619
	501	542	549	566	612	620
	496	545	543	567	605	624
		540		575	608	627
		532				620
Průměrná hodnota [μm]	496,8	535,7	548,8	564,8	605,3	620,9
Nejnižší hodnota [μm]	493	526	543	553	598	616
Nejvyšší hodnota [μm]	501	545	554	575	612	627
Rozptyl hodnot [μm]	8,0	19,0	11,0	22,0	14,0	11,0
Ztenčení (průměr) [%]	17,2	10,7	8,6	16,9	11,0	8,7

8.1.4 Vyhodnocení, dílčí závěr

V tabulce 8-7 jsou uvedeny průměrné hodnoty ztenčení v měřeném bodě, získané pomocí numerické simulace a měření tloušťky pomocí konfokálního mikroskopu.

Tabulka 8-7, Porovnání hodnot získaných z jednotlivých metod

Označení vzorku	DP500 R0,5	DP500 R1,5	DP500 R2,0	CR180BH R0,5	CR180BH R1,5	CR180BH CR2,0
Analýza ARGUS Ztenčení (průměr) [%]	11,4	18,6	7,6	11,3	19,8	11,8
Numerická simulace Ztenčení (průměr) [%]	18,2	10,7	8,3	16,9	10,2	8,5
Metalografický výbrus Ztenčení (průměr) [%]	17,2	10,7	8,6	16,9	11,0	8,7

Porovnáním výsledků v tabulce 8-7 je patrná vyšší shoda (menší rozdíly) mezi měřením tloušťky pomocí konfokálního mikroskopu (metalografický výbrus) a simulací zjištěným ztenčením plechu (simulace AutoForm). S rostoucí hodnotou poloměru zaoblení tažnice, dochází ke snížení rozptylu mezi hodnotami získanými během lisování a z numerické simulace.

Navzdory odlišným mechanickým vlastnostem jsou hodnoty ztenčení na rádiu výlisku (získané metalografickým výbrusem i numerickou simulací) pro oba materiály prakticky totožné. Z tohoto hlediska lze ocel DP500 hodnotit pro vybraný typ výlisku jako podobně zpracovatelnou. Ověření použitelnosti oceli a hodnocení shody s numerickou simulací je provedeno od technologicky jednodušších výlisků po složitější.

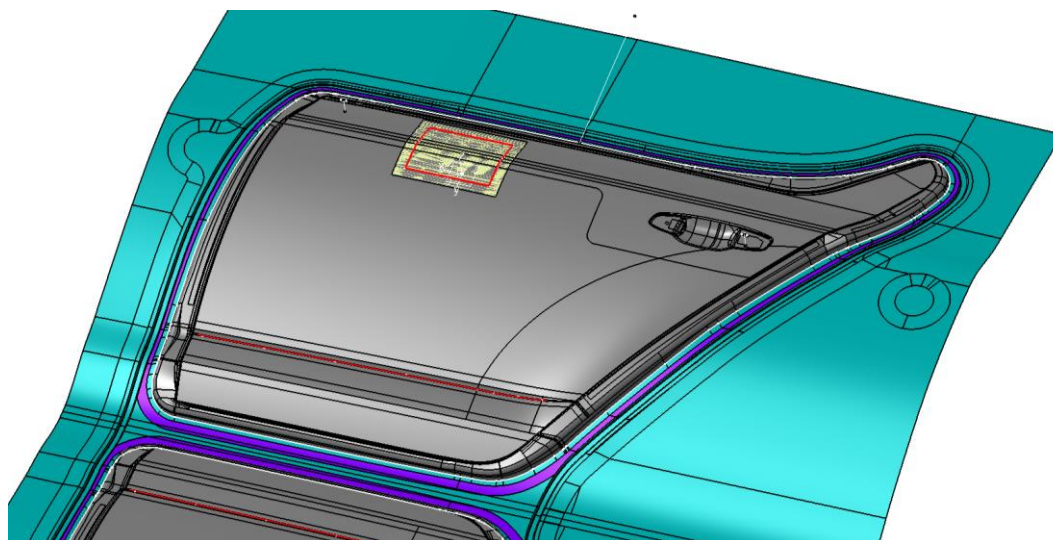
Výsledkem analýzy je současně i doporučení pro použití jemnější deformační sítě v případě použití systému ARGUS. Pro dostatečný popis poloměru, a to alespoň 4 body (při využití tažníku R0,5), je nutné využít síť s výchozí relativní vzdáleností bodů blížící se 0,15 mm.

U vzorků z oceli DP500 je s ohledem na vyšší pevnost materiálu zjevná tvorba zvlnění ve válcové části výlisku. Tato skutečnost může být překážkou v případě, kdy je silová kapacita stroje vytížena již při použití oceli s nižší pevností než DP500. [15A, 16A]

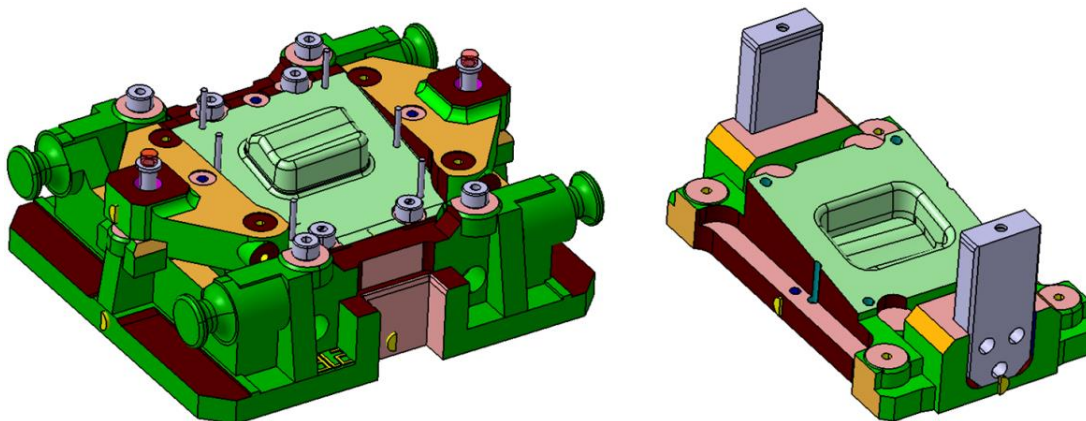
8.2 Čtyřhranná nádoba s designovou hranou

Lisování čtyřhranné nádoby s designovou hranou „Tornado“ je obdobné experimentu lisování rotačně symetrického kalíšku, uvedeném v kapitole 8-1. Výsledek numerické simulace v programu AutoForm R6 byl konfrontován s výsledkem reálných lisovacích zkoušek. Ztenčení bylo hodnoceno pomocí systému ARGUS 12M a metalografického výbrusu měřeném pomocí konfokálního mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000. V rámci analýzy byl sledován pouze materiál DP500 (tloušťka 0,55 mm).

Nástroj reprezentuje vybranou oblast na povrchu vnějších zadních dveří u vozu ŠKODA Octavia III. generace, viz obrázek 8-9. Výlisek je zvolen právě kvůli designové hraně: podobný designový prvek je využíván na mnoha současných modelech (i jiných značek). Chování materiálu na tomto designovém prvku je klíčové s ohledem na tvorbu přetažené hrany (auditová závada) a např. i hodnocení životnosti nástroje. Obrázek 8-10 reprezentuje 3D model sestavy s tažníkem a tažnicí.



Obrázek 8-9, Vizualizace průniku ploch výlisku a vnějších zadních dveří vozu ŠKODA Octavia III.



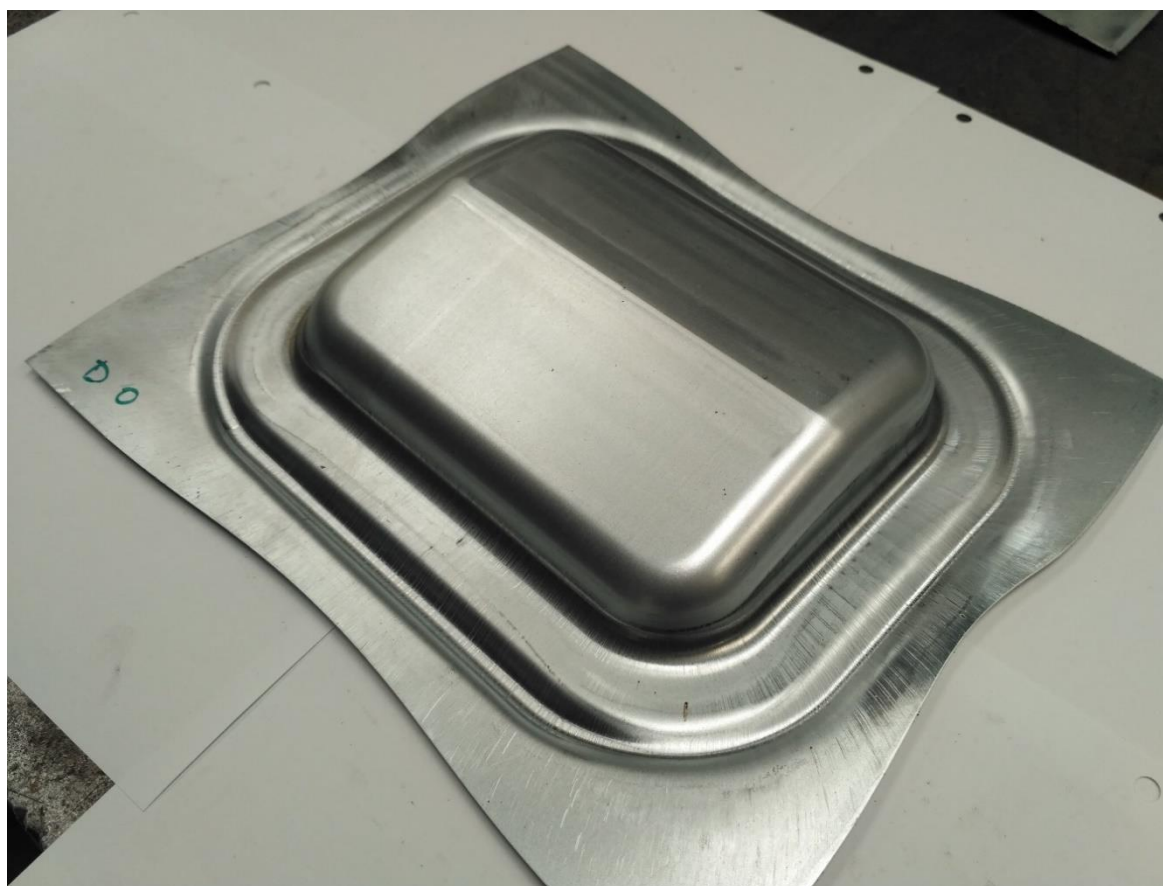
Obrázek 8-10, 3D model sestavy lisovacího nástroje; vlevo spodní část, vpravo horní část nástroje

Experiment výroby výlisku byl realizován v laboratořích Ústavu strojírenské technologie, Fakulty strojní, ČVUT v Praze. Materiál pro zkoušky byl poskytnut společností ŠKODA AUTO, a.s.

Na obrázcích 8-11 a 8-12 je zachycen lisovací nástroj a vybraný výlisek.



Obrázek 8-11, Snímek lisovacího nástroje "Tornado"



Obrázek 8-12, Výtažek z oceli DP500

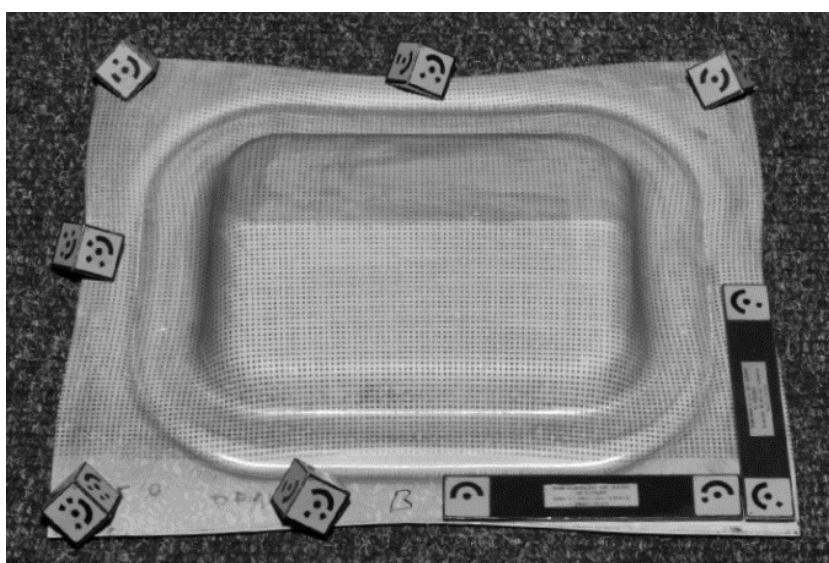
8.2.1 Měření pomocí systému ARGUS

Stejně jako v případě rotačně symetrického výlisku byla na povrch plechu elektrochemicky vyleptána deformační síť s průměrem bodů 1 mm a relativní vzdáleností 2 mm. Vyhodnocení bylo provedeno systémem ARGUS 12M. Přístřih o rozměrech 235x265 mm byl vystřižen po nanesení deformační sítě.

Na obrázku 8-13 je uveden výtažek s nanesenou deformační sítí. Na obrázku 8-14 je uveden výtažek během analýzy systémem ARGUS. Výsledek vyhodnocení je pro přehlednost uveden až v kapitole 8.2.4.



Obrázek 8-13, Výtažek z oceli DP500 s nanesenou deformační sítí

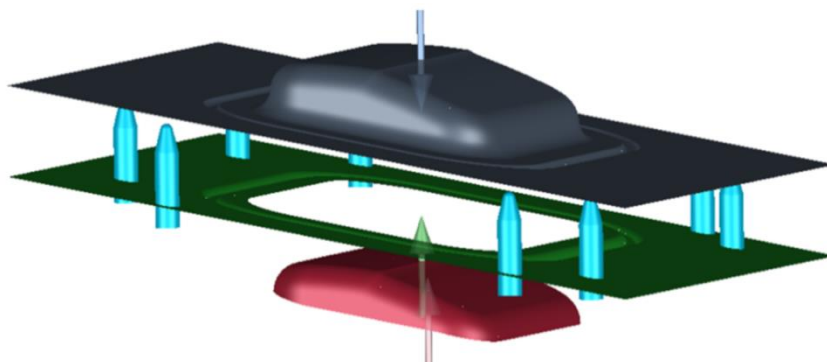


Obrázek 8-14, Výtažek z oceli DP500 s referenčními kameny a kalibračními měrkami systému ARGUS

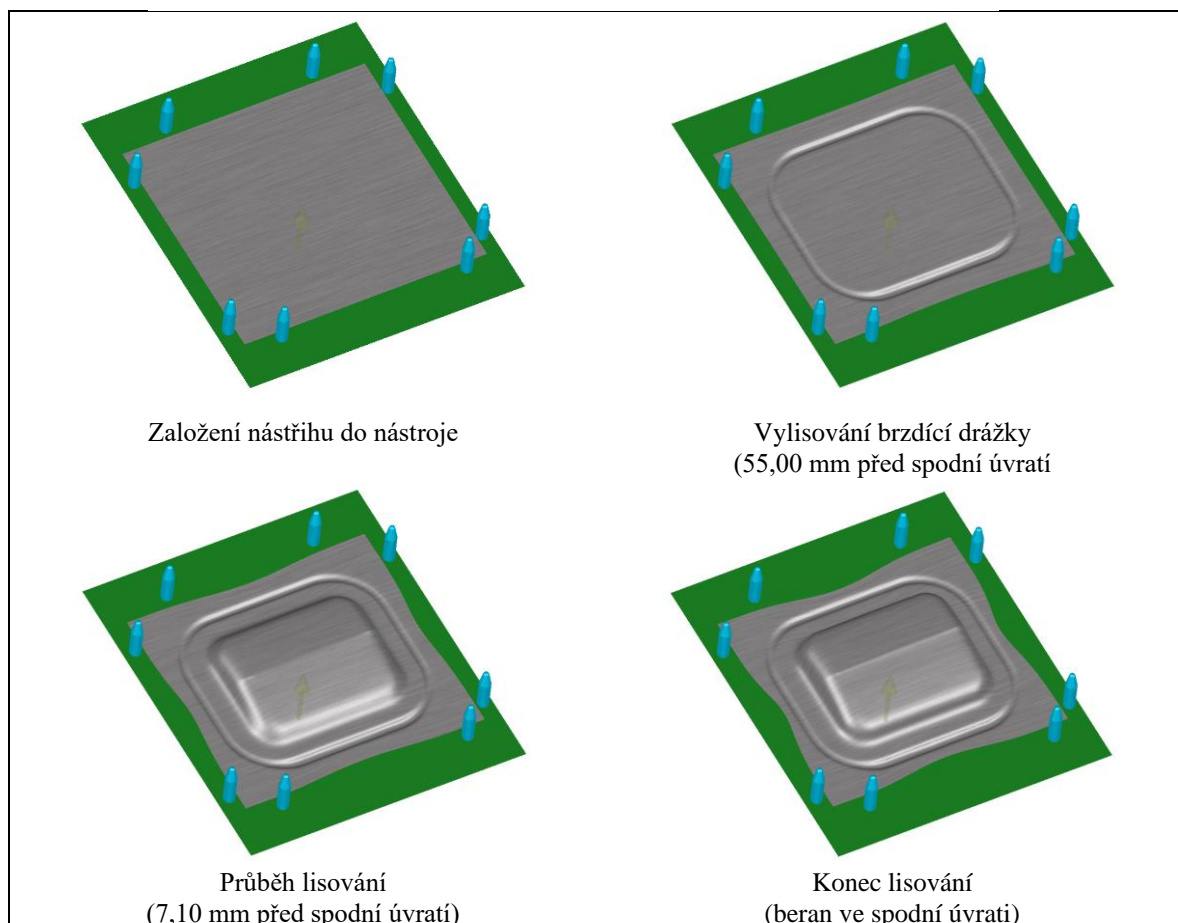
8.2.2 Numerická simulace

Výpočet byl realizován v softwaru AutoForm R6. Nastavení výpočtu je v kvalitě „FV“, uvedené v tabulce 7-1. Lisovací nástroje byly definovány na základě NCM dat použitých pro frézování. NCM data již obsahují brzdící drážku vymodelovanou na tažnici i přídržovači. Výsledky simulace jsou pro přehlednost uvedeny až v kapitole 8.2.4.

Na obrázku 8-15 je zobrazen model lisovacího nástroje. Síla přídržovače je vyvozena plynovými pružinami a navyšuje se ze 126,0 kN (55 mm před spodní úvratí) na 195,3 kN ve spodní úvratí. Kaskáda snímků reprezentující průběh lisování je uvedena na obr. 8-16.



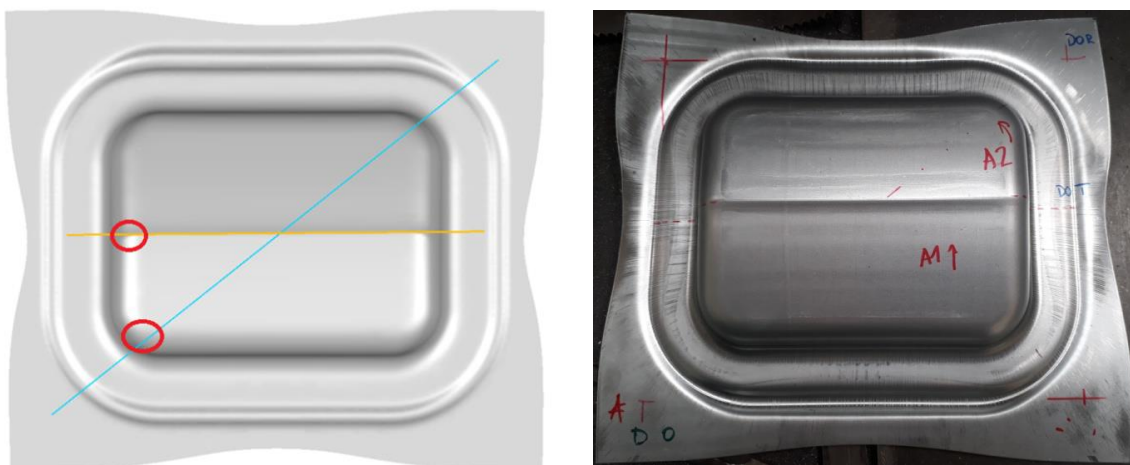
Obrázek 8-15, Vylisek "Tornado", nástroje v numerické simulaci



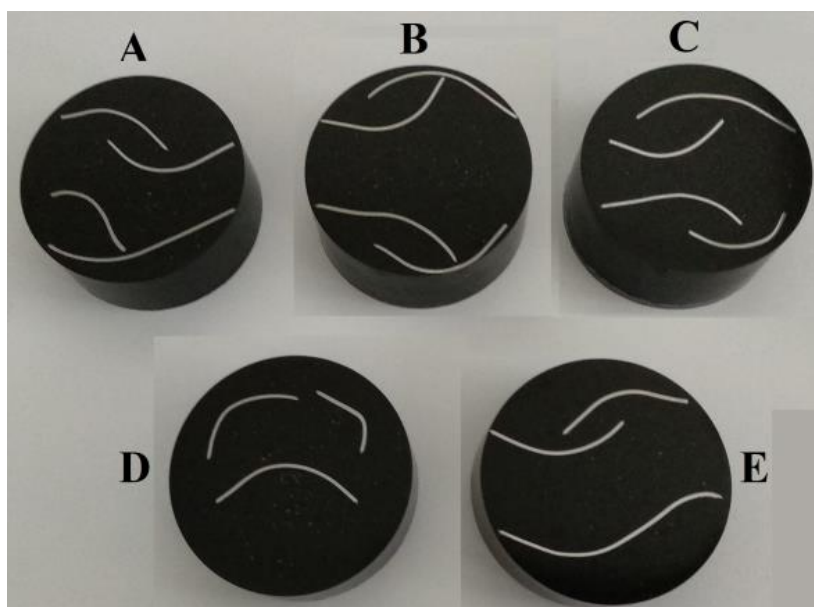
Obrázek 8-16, Sekvence snímků zachycující lisování čtyřhranné nádoby

8.2.3 Metalografická analýza pro měření tloušťky plechu

Ztenčení materiálu bylo pozorováno v oblastech s nejvyšším rizikem vzniku trhliny. Návrh oblastí a fyzická příprava jsou uvedeny na obrázku 8-17. První řez je veden v ose designové hrany (oblast „tornádo“), druhý pak protíná pomyslný průnik brzdících lišt (oblast „roh“). V každém řezu byla sledována červeně vyznačená oblast. Oblasti byly vytipovány na základě předchozí zkušenosti s lisovacím nástrojem. Zhotovené metalografické výbrusy jsou zobrazeny na obrázku 8-18. Měření tloušťky bylo realizováno pomocí konfokálního mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000.

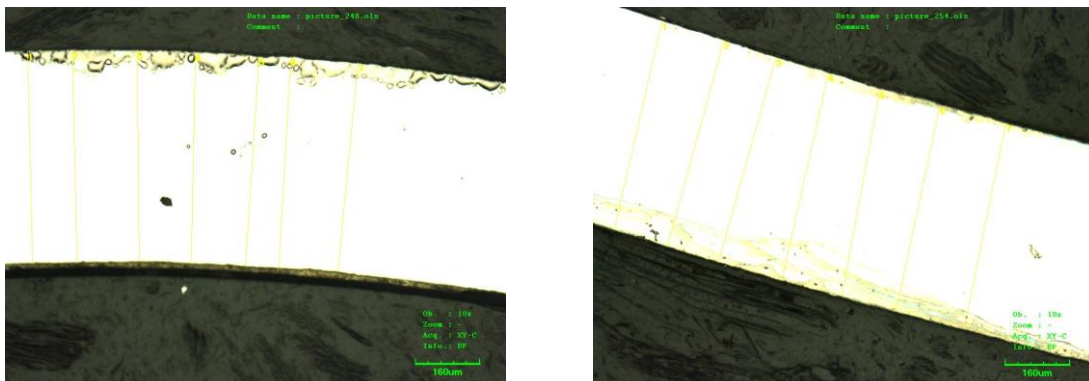


Obrázek 8-17, Návrh sledovaných oblastí na výlisku (vlevo) a příprava pro zhotovení výbrusů (vpravo)



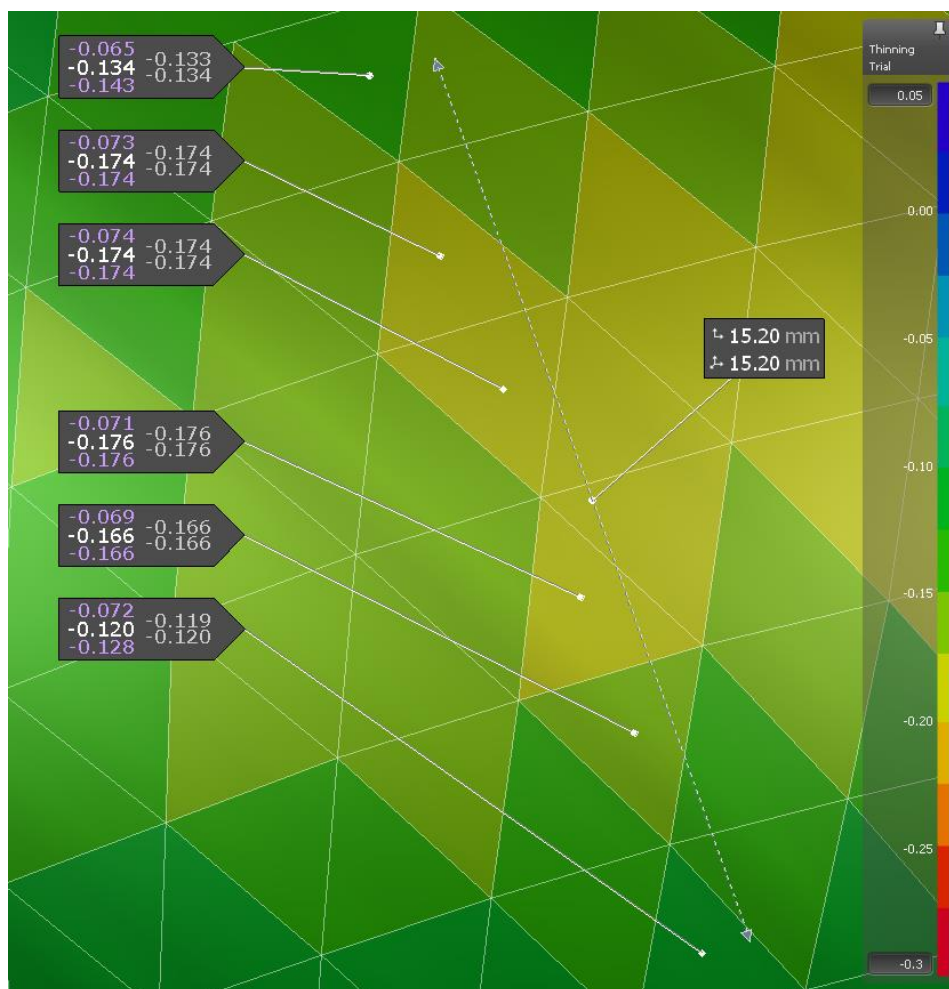
Obrázek 8-18, Zhotovené metalografické výbrusy pro vzorek A až E

Snímky z měření vzorku A na konfokálním mikroskopu jsou uvedeny na obrázku 8-19.



Obrázek 8-19, Metalografické výbrusy, vzorek A; oblast Tornádo (vlevo), oblast "roh" (vpravo)

V rámci přípravy metalografického výbrusu je problémovým bodem nalezení kritického místa. Na obrázku 8-20 je zobrazena série 6 sousedících elementů sítě, kdy rozdíl mezi hodnotami ztenčení je v tomto případě až 4,5 % mezi sousedními elementy. Podobný gradient hodnot ztenčení lze očekávat i na reálném výlisku. Zhotovení metalografického výbrusu mimo místo s maximální hodnotou ztenčení proto může vést k získání hodnot lišících se od výsledků numerické simulace a výsledků ze systému ARGUS.



Obrázek 8-20, Průběh hodnot ztenčení na 6 sousedních elementech MKP sítě

8.2.4 Vyhodnocení, dílčí závěr

V tabulkách 8-8 a 8-9 jsou uvedeny získané hodnoty tloušťky pro 2 oblasti vyznačené na obrázku 8-17. Z předložených dat lze pozorovat významný vliv skutečnosti, že řezy nebyly provedeny identicky pro vzorky A až E. SW AutoForm R6 i systém ARGUS 12M umožňují uživateli nalezení lokálních maxim a minim sledovaného parametru v dané oblasti. Srovnání získaných hodnot je proto v tomto případě spolehlivější než v případě výsledků získaných měření vzorků pomocí konfokálního mikroskopu. [15A]

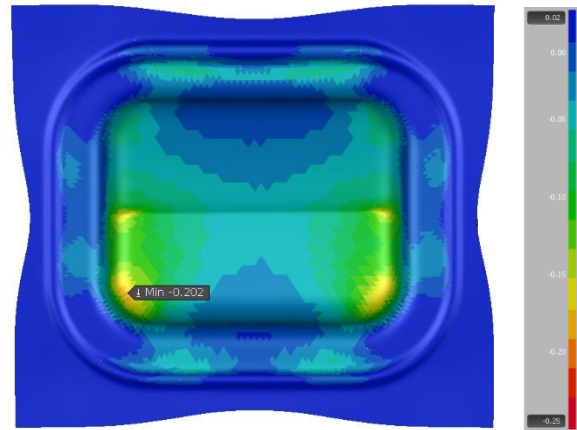
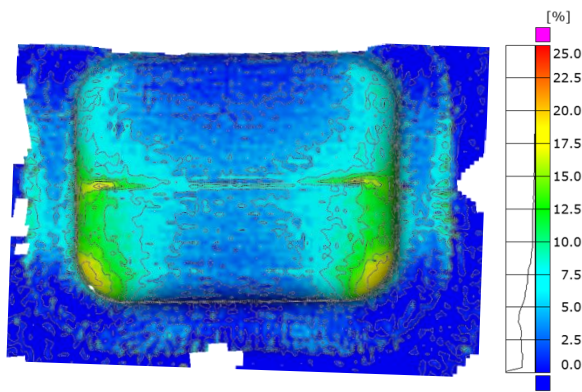
Tabulka 8-8, Metalografický výbrus, hodnoty pro oblast "Tornado"

Označení vzorku	A	B	C	D	E
Výchozí tloušťka [μm]	610	610	610	610	610
Naměřená tloušťka [μm]	508	516	522	525	510
	511	516	520	528	509
	510	515	522	527	508
	513	512	521	531	510
	514	508	518	530	513
	514	505	520	532	512
Průměrná hodnota [μm]	512	512	521	529	510
Ztenčení (průměr) [%]	16,1	16,1	14,7	13,3	16,4

Tabulka 8-9, Metalografický výbrus, hodnoty pro oblast "roh"

Označení vzorku	A	B	C	D	E
Výchozí tloušťka [μm]	610	610	610	610	610
Naměřená tloušťka [μm]	541	520	552	542	543
	539	516	555	538	544
	540	516	557	542	549
	539	518	549	541	545
	536	520	550	538	548
	540	517	550	542	546
Průměrná hodnota [μm]	538	518	552	540	546
Ztenčení (průměr) [%]	11,8	15,1	9,5	11,5	10,5

Na obrázku 8-21 je uveden grafický výstup ze systému ARGUS a na obrázku 8-22 výstup z numerické simulace. Z tabulky 8-10 je patrná vyšší shoda (menší rozdíly) mezi experimentálně naměřenou tloušťkou (ARGUS) a simulací zjištěným ztenčením plechu (simulace AUTOFORM). Neshoda výsledků získaných z měření na konfokálním mikroskopu je diskutována v předchozích odstavcích.



Obrázek 8-21, Systém ARGUS, výsledek ztenčení

Obrázek 8-22, AutoForm R6, výsledek ztenčení

Tabulka 8-10, Porovnání hodnot získaných z jednotlivých metod

Sledovaná oblast	„Tornádo“	„Roh“
Analýza ARGUS Ztenčení (průměr) [%]	20,5	19,1
Numerická simulace Ztenčení (průměr) [%]	21,3	20,2
Metalografický výbrus Ztenčení (průměr) [%]	15,3	11,7

Numerická simulace správně detekovala oblasti s nejvyšší mírou ztenčení materiálu. Rozdíl mezi hodnotami získanými v numerické simulace a pomocí systému ARGUS je do 10%. Lze tvrdit, že shoda numerické simulace a měření ze systému ARGUS je proto pro konkrétní výlisek dostatečná. [15A, 17A]

8.3 Fabia III, dveře vnější zadní

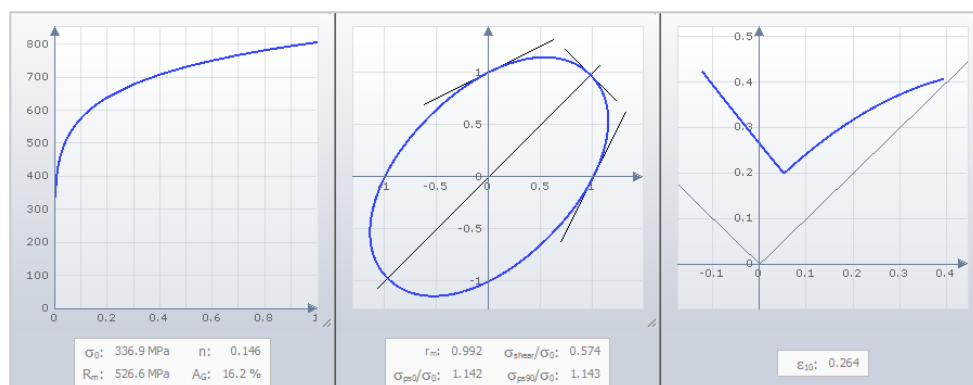
Za účelem verifikace materiálových karet a ověření poznatků uvedených v kapitole 8.1 a 8.2 byly výtípovány 2 výlisky, které vzhledem ke své geometrii připouští možnost nasazení materiálu DP500 pro podobné díly v budoucích projektech. Vybranými díly jsou výlisek „zadní dveře vnější“ použitý na voze FABIA (III. generace) a výlisek „páté dveře vnější spodní“ použitý na voze RAPID SPACEBACK. V rámci experimentu bylo sledování chování materiálu DP500 a CR180BH.

8.3.1 Materiálové karty

V případě použití oceli DP500 pro výrobu sériově vyráběných dílů je nutná detailní znalost chování materiálu. Dílčím cílem experimentu uváděného v kapitole 8.3 je výběr materiálové karty, která z hlediska chování (míra odpružení, ztenčení výlisku, tvorba trhlin apod.) nejlépe odpovídá reálnému lisovacímu procesu. Mechanické vlastnosti použité v jednotlivých materiálových kartách jsou uvedeny v tabulce 8-11. Křivka zpevnění, křivka plasticity a křivka mezních deformací pro jednotlivé modely je uvedena na obrázcích 8-23 až 8-25.

Tabulka 8-11. přehled mechanických vlastností u použitých materiálových karet

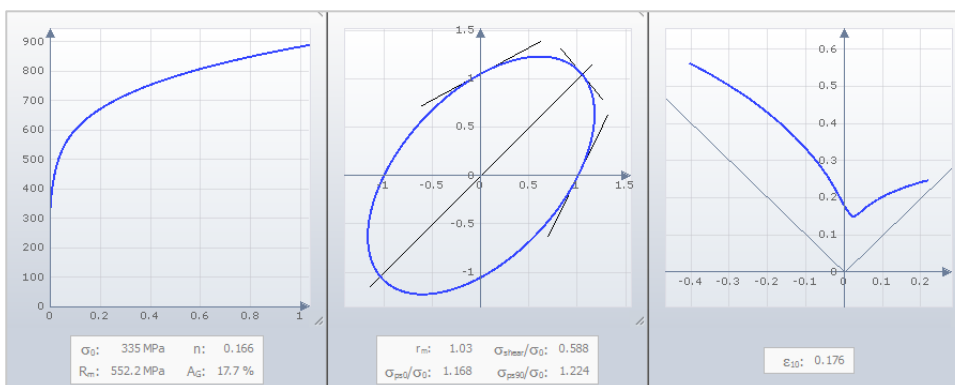
Materiálový model	Mez kluzu	Mez pevnosti	Celková tažnost	Součinitel plastické anizotropie	Exponent deformačního zpevnění
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	$A_{80\text{ mm}}$ [%]	$r_{m/20}$ [-]	$n_{10-20/Ag}$ [-]
TU Liberec	336,9	526,6	16,2	0,99	0,146
AutoForm	320,8	511,8	17,7	0,96	0,171
Koncern VW	335,0	552,2	17,7	1,03	0,166



Obrázek 8-23, Materiálová karta „TU Liberec“



Obrázek 8-24. Materiálová karta „AutoForm“



Obrázek 8-25. Materiálová karta „Konzern VW“

8.3.2 Charakteristika dílu a lisovacího procesu

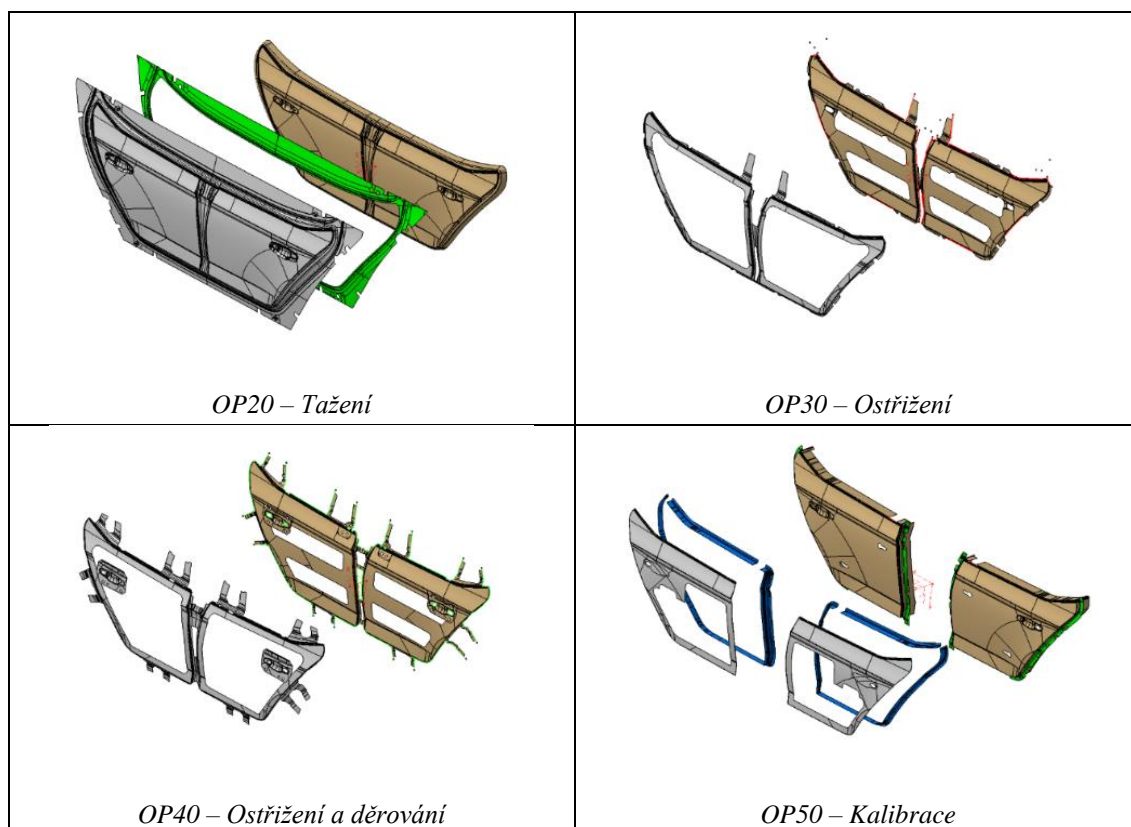
Analyzovaným dílem jsou „dveře vnější zadní“, které jsou lisovány pro současnou produkci vozu ŠKODA FABIA (vyráběna od roku 2014). Zmiňovaný díl je společně s celým vozem vyobrazen na obrázku 8-26.



Obrázek 8-26. FABIA III (vlevo), zadní dveře vnější (vpravo)

Numerická simulace použitá v experimentu je postavena na bázi frézovacích dat s uvolněním při odlití a frézování. Tvar nástrojů použitých pro výpočet je uveden na obrázku 8-27. Provedena byla korekce ploch pro operaci tažení na základě skenu reálného nástroje.

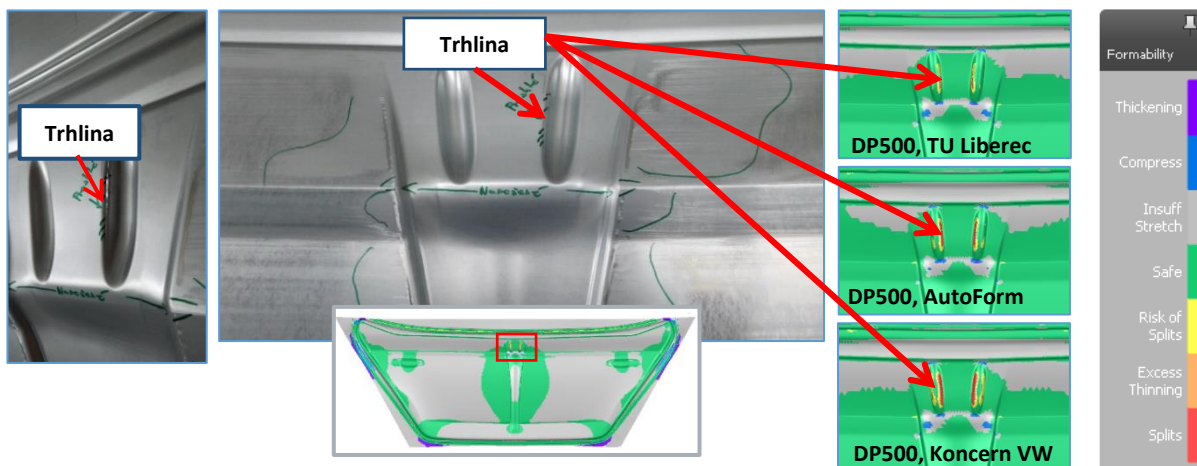
Referenční simulace, sloužící pro ověření správnosti nastavení numerické simulace, počítá s materiálem CR180BH. Simulace s materiálem DP500 zohledňuje skutečnost, že byl nástroj zapracován na odlišnou tloušťku materiálu. Počítána je simulace se všemi třemi materiálovými kartami pro DP500. Pro výpočet byl využit software AutoForm R6. Povrch reálného výlisku byl snímán pomocí laserového skeneru CMS 106 od společnosti HEXAGON.



Obrázek 8-27. přehled nástrojů (v numerické simulaci) a operací pro výrobu dílu

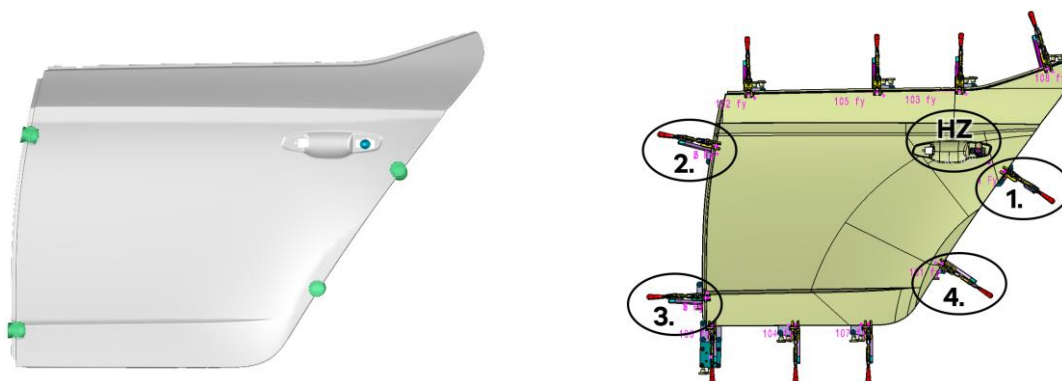
8.3.3 Vyhodnocení, dílčí závěr

Zkoušky lisování probíhaly na sériovém lisu v lisovně ŠKODA AUTO, a.s., při produkčním taktu. Zmíněné zapracování nástroje na větší tloušťku materiálu může mít vliv na tvorbu zvlnění či výskyt dalších auditových závad na výlisku. Parametr „Formability“ na výlisku po OP20 (hluboký tah) je uveden na obrázku 8-28. Z obrázku vyplývá, že numerická simulace správně identifikuje vznik trhlin v oblasti technologických ploch mezi pravými a levými dveřmi.



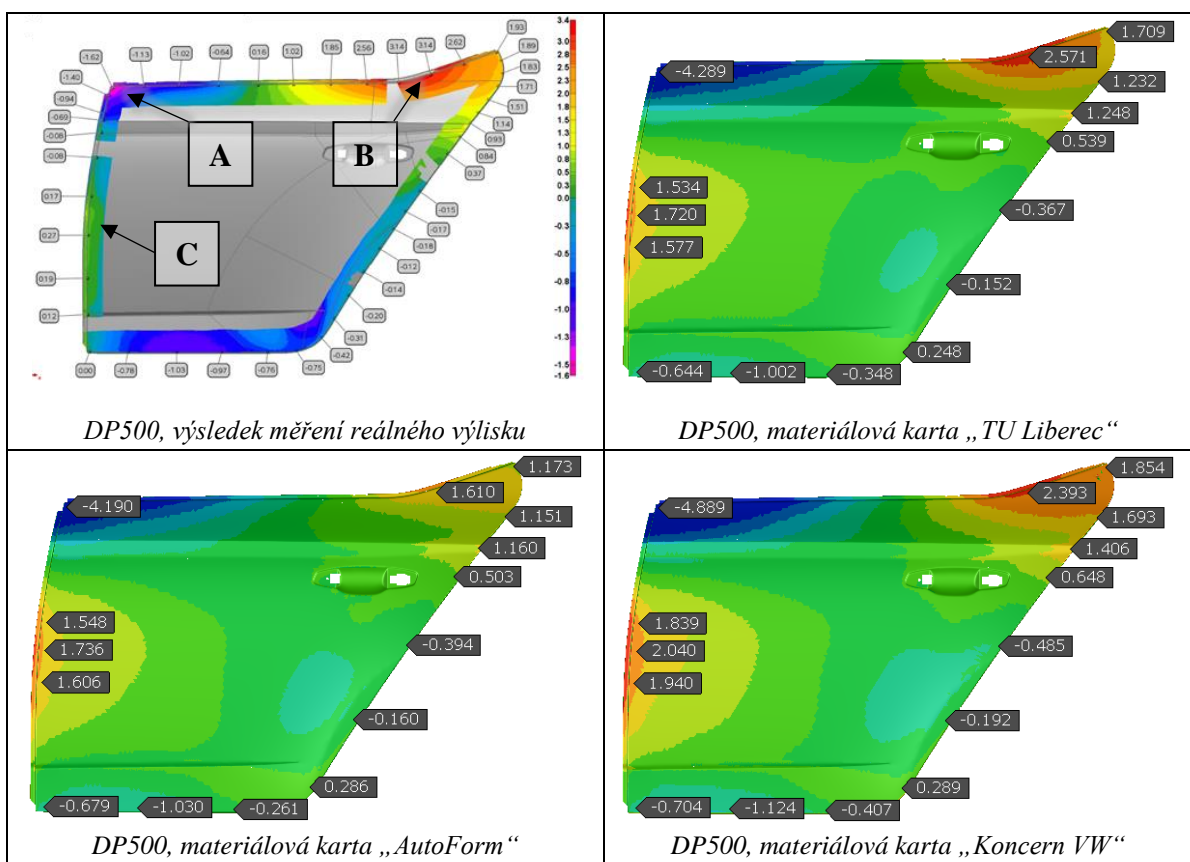
Obrázek 8-28. "Formability" po OP20

Analýza odpružení byla provedena s ohledem na reálný měřicí proces. Dodržena byla poloha RPS bodů (bodů, na kterých je výlisek upínán) společně s pořadím upnutí. Grafické zobrazení upnutí výlisku je uvedeno na obrázku 8-29.



Obrázek 8-29. Přehled umístění RPS bodů využívaných pro měření odpružení výlisku

Na obrázku 8-30 je uveden výsledek analýzy odpružení pro zmiňované materiálové modely. Ve všech třech případech došlo ke shodě trendu odpružení v oblasti A, kde výlisek vykazuje nejvyšší míru odpružení ve směru do vozu. V oblasti B (největší odpružení směrem z vozu) je trend odpružení nejlépe predikován materiálovou kartou „TU Liberec“, hodnota odpružení u tohoto modelu se zároveň nejvíce blíží reálnému měření. Nejvyšší neshoda reálného měření a numerické simulace nastává v oblasti C, kde hodnota odpružení při reálném měření nevykazuje tak vysokou míru odpružení. Z hlediska trendu průběhu odpružení lze říci, že materiálový model „TU Liberec“ nejlépe odpovídá výsledku fyzického skenování. Auditové hodnocení výlisku z materiálu CR180BH a DP500 je zařazeno v přílohách disertační práce č. 1. [1A, 18A]



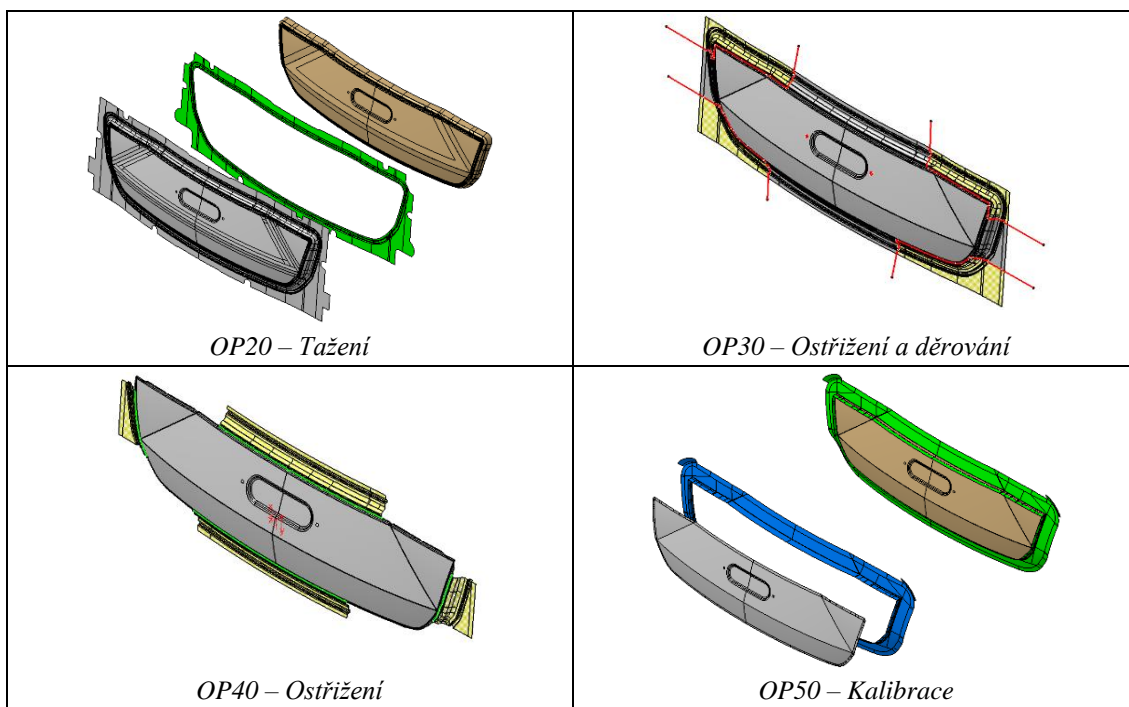
Obrázek 8-30. Výsledky reálného měření a virtuální analýzy odpružení

8.4 Rapid Spaceback, páté dveře vnější spodní

Druhým analyzovaným dílem jsou „páté dveře vnější spodní“, které jsou lisovány pro vůz ŠKODA RAPID SPACEBACK (vyráběný od roku 2013). Zmiňovaný díl je společně s vozem vyobrazen na obrázku 8-31. Postup numerické simulace je totožný jako v případě projektu Fabia III. Geometrie lisovacích nástrojů je uvedena na obrázku 8-32.



Obrázek 8-31. RAPID SPACEBACK, 5. dveře vnější spodní

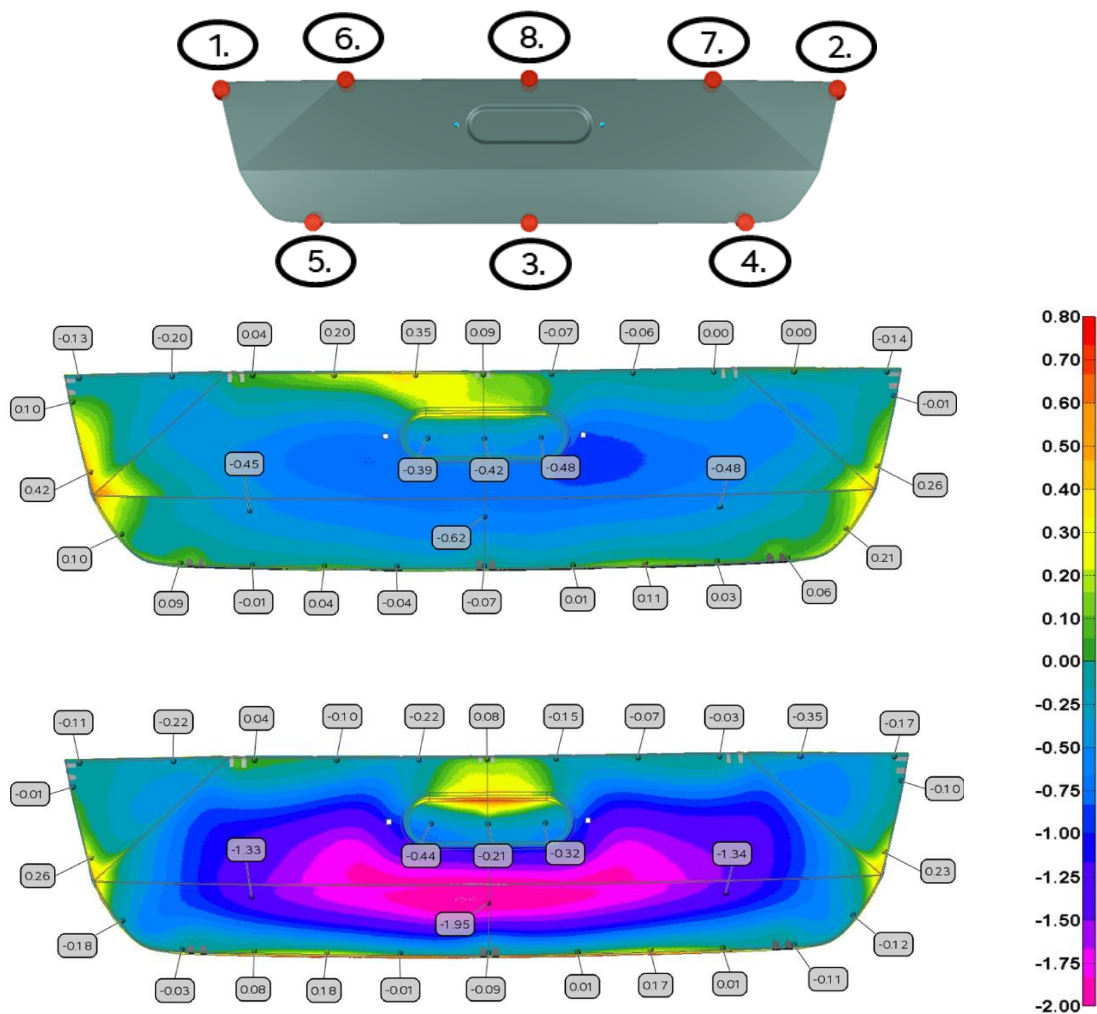


Obrázek 8-32. přehled nástrojů a operací pro výrobu dílu

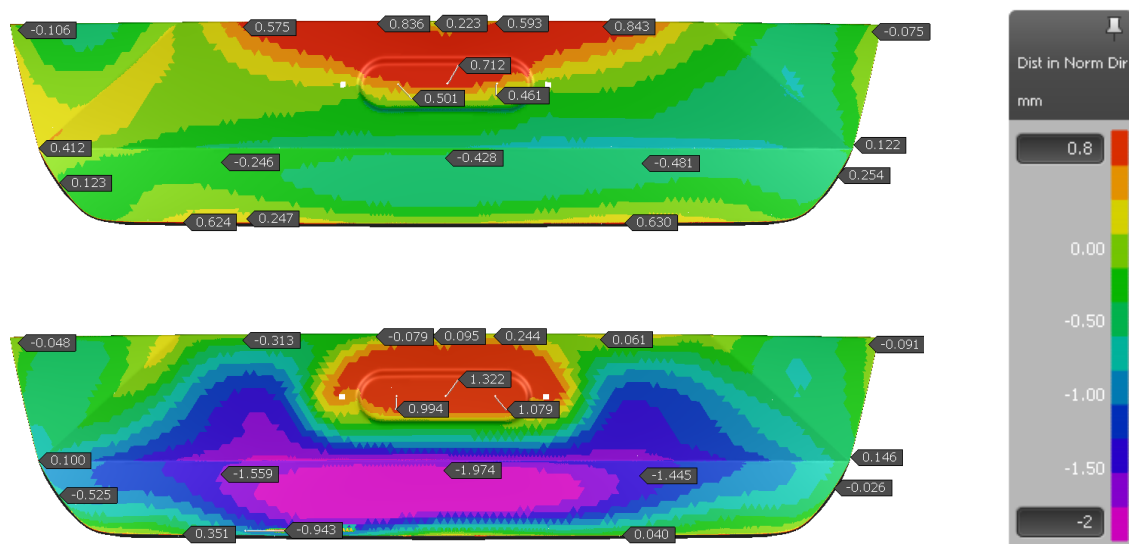
8.4.1 Výsledky experimentu

Na základě výsledků získaných při hodnocení dílu dveří vnějších předních, byla pro výpočet použita pouze materiálová karta „TU Liberec“. Cílem této části experimentu je především hodnocení přesnosti predikce odpružení pro vybraný díl. Pro výpočet byl opět využit software AutoForm R6. Povrch reálného výlisku byl snímán pomocí laserového skeneru CMS 106 od společnosti HEXAGON.

8.4.2 Analýza odpružení s použitím 8 RPS bodů a 2 pilotů

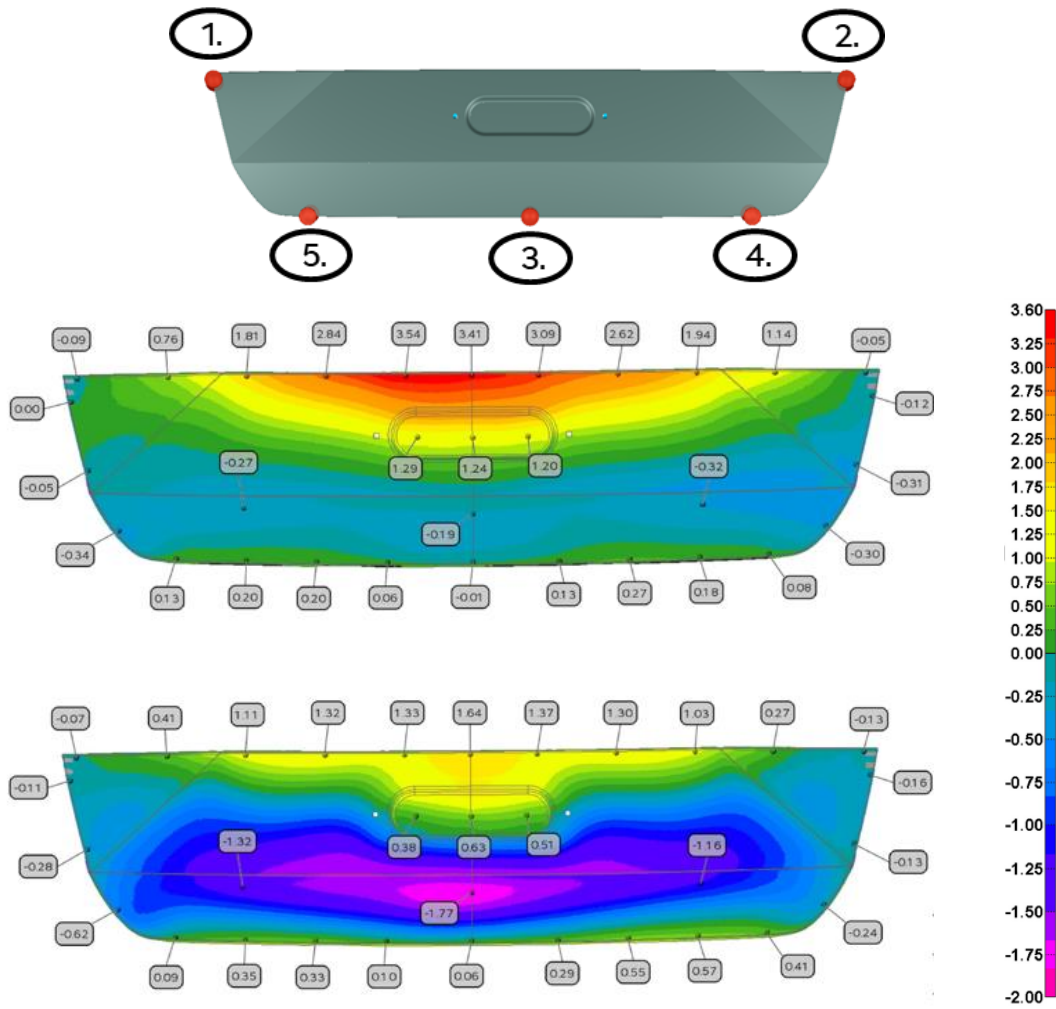


Obrázek 8-33. Výsledek měření odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)

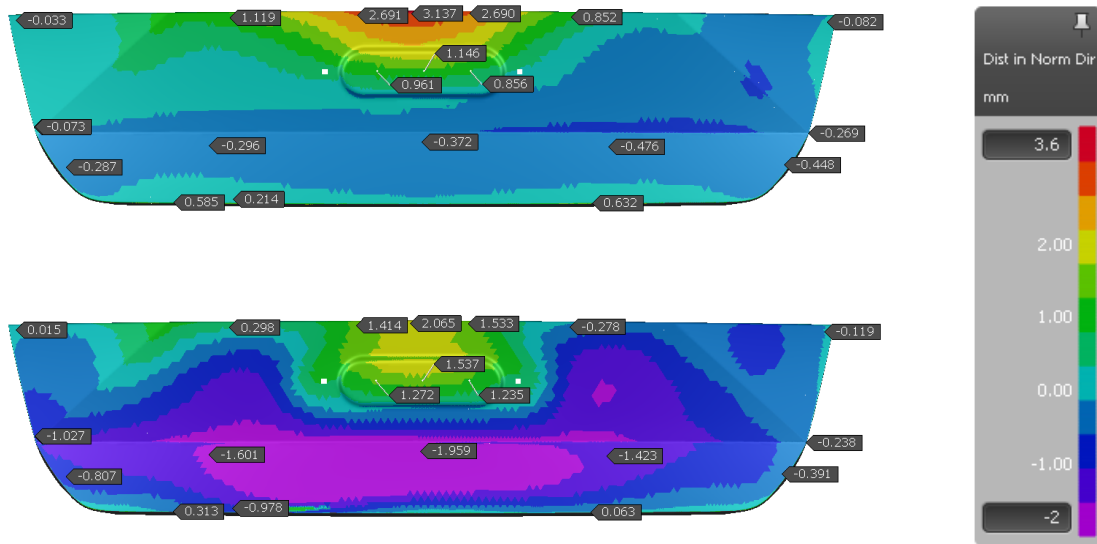


Obrázek 8-34. Výsledek virtuální analýzy odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)

8.4.3 Analýza odpružení s použitím 5 bodů RPS a 2 piloty



Obrázek 8-35. Výsledek měření odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)



Obrázek 8-36. Výsledek virtuální analýzy odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)

Shodu numerické simulace a fyzického výlisku „pátých dveří vnějších spodních“ lze hodnotit pomocí trendu odpružení. Oblasti maximálních i minimálních hodnot jsou identické pro výsledky fyzické analýzy (měření pomocí skenu) a virtuální analýzy (SW AutoForm) a to pro variantu s 8 RPS body, viz obrázek 8-33 a 8-34, i pro variantu s 5 RPS body, viz obrázek 8-35 a 8-36. Rozdílná je pouze velikost plochy oblasti extrémů a hodnota odpružení, a to především pro kladné hodnoty odpružení („směrem z vozu“).

Nejistota virtuální predikce odpružení je podobná pro oba sledované materiály. Lze tvrdit, že přesnost predikce odpružení pro materiál DP500 se proti sériově používanému materiálu CR4 významně neliší. Případná kompenzace odpružení v předvýrobní fázi je tedy možná pro oba řešené materiály a toto kritérium není překážkou použitelnosti oceli DP500.

Pozn.: Při hodnocení je nutné zohlednit, že přestože jsou maximální hodnoty škály identické, bod s nulovou hodnotou nemá v numerické simulaci a u reálného měření stejnou polohu v barevném spektru.

8.4.4 Vyhodnocení, dílčí závěr

Zkoušky s materiálem DP500 prokázaly z hlediska lisovatelnosti možnost nasazení pro povrchové díly. Rozměrovost a kvalitu dílu lze hodnotit jako dostatečnou.

Výsledky numerické simulace i zkoušek lisování potvrzují předpoklad vyšší míry odpružení vyplývající z vyšší pevnosti materiálu. Tato skutečnost podtrhuje potřebu metodiky pro virtuální kompenzaci odpružení v předvýrobní fázi výroby lisovacího nástroje. Finanční náklady na dodatečnou korekci nástroje mohou být s ohledem na vyšší míru odpružení významně vyšší, např. potřeba použití broušené desky pro dodatečné podložení tažníku po frézování jeho tvaru. [2A]

Před sériovou výrobou dílů z materiálu DP500 je pro ověření použitelnosti dílu z vysokopevnostní oceli nutné provedení navazujících zkoušek: např. zkouška lemování, zkouška lakování, korozní zkoušky apod. Tyto zkoušky nejsou předmětem dílčího experimentu. Je nutné podotknout, že nasazení materiálu DP500 je podmíněno vhodnou geometrií dílu. [1A, 14A, 18A]

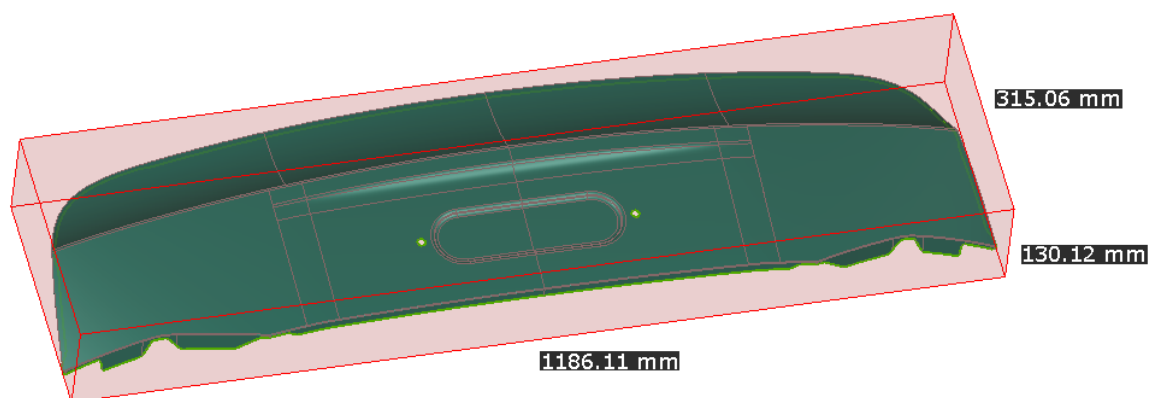
8.5 Octavia 4, páté dveře vnější spodní

Pro kompletní ověření navržené metodiky byl vybrán díl „páté dveře vnější spodní“ (HKau), které jsou lisovány pro vůz ŠKODA OCTAVIA COMBI (4. generace), sériově vyráběný od roku 2020. Zmiňovaný díl je společně s vozem vyobrazen na obrázku 8-37 (vyznačen zeleně). Kapitola popisuje celý proces výroby dílu zahrnující: úpravy geometrie dílu s ohledem na vyrobitelnost, numerickou simulaci (na základě které budou vyrobeny lisovací nástroje), porovnání s výsledky lisování a sestavu pátých dveří.



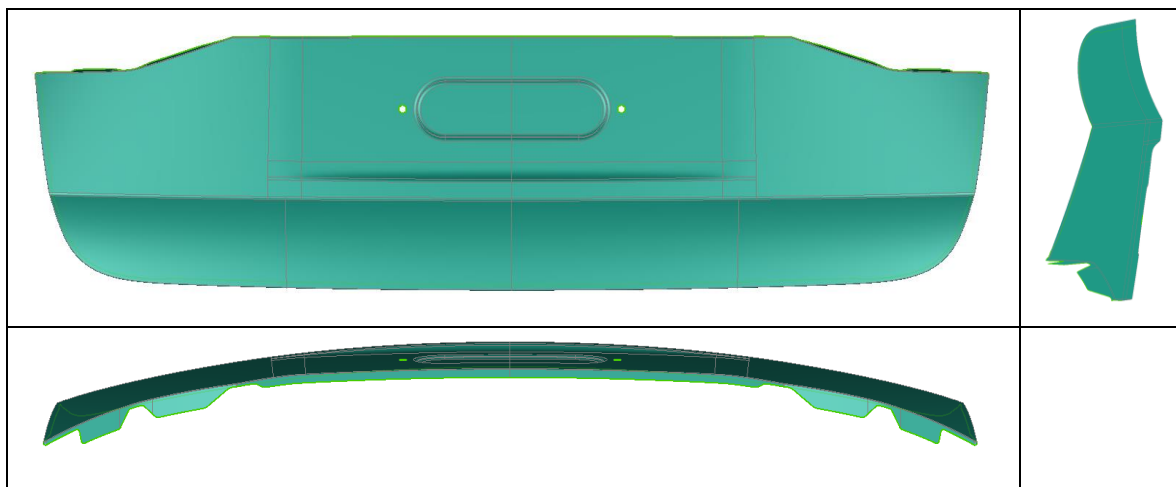
Obrázek 8-37, ŠKODA OCTAVIA COMBI 4. generace s vyznačeným dílem HKau

Vybraným materiálem pro výrobu dílu je ocel DP500 o tloušťce 0,55 mm (tloušťka vyplývá z typu výlisku). Finální velikost nástřihu je 1400x470 mm.



Obrázek 8-38, HKau, pohled na finální vyráběný díl (TM6), měření v SW AutoForm R6

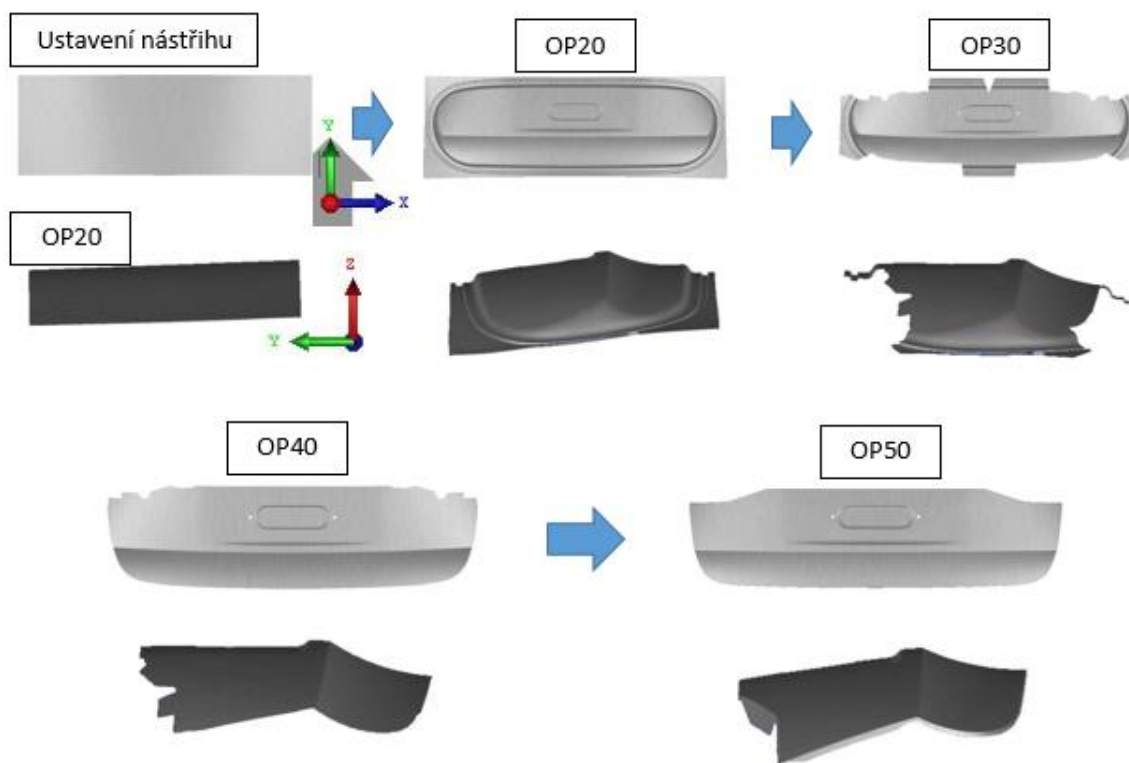
Na obrázku 8-39 jsou zobrazeny charakteristické pohledy. Výlisek se v porovnání s ostatními pohledovými díly karoserie vyznačuje relativně malou hloubkou tahu a stojinami výrobitelnými v jediné operaci.



Obrázek 8-39, HKau, pohledy ISO E

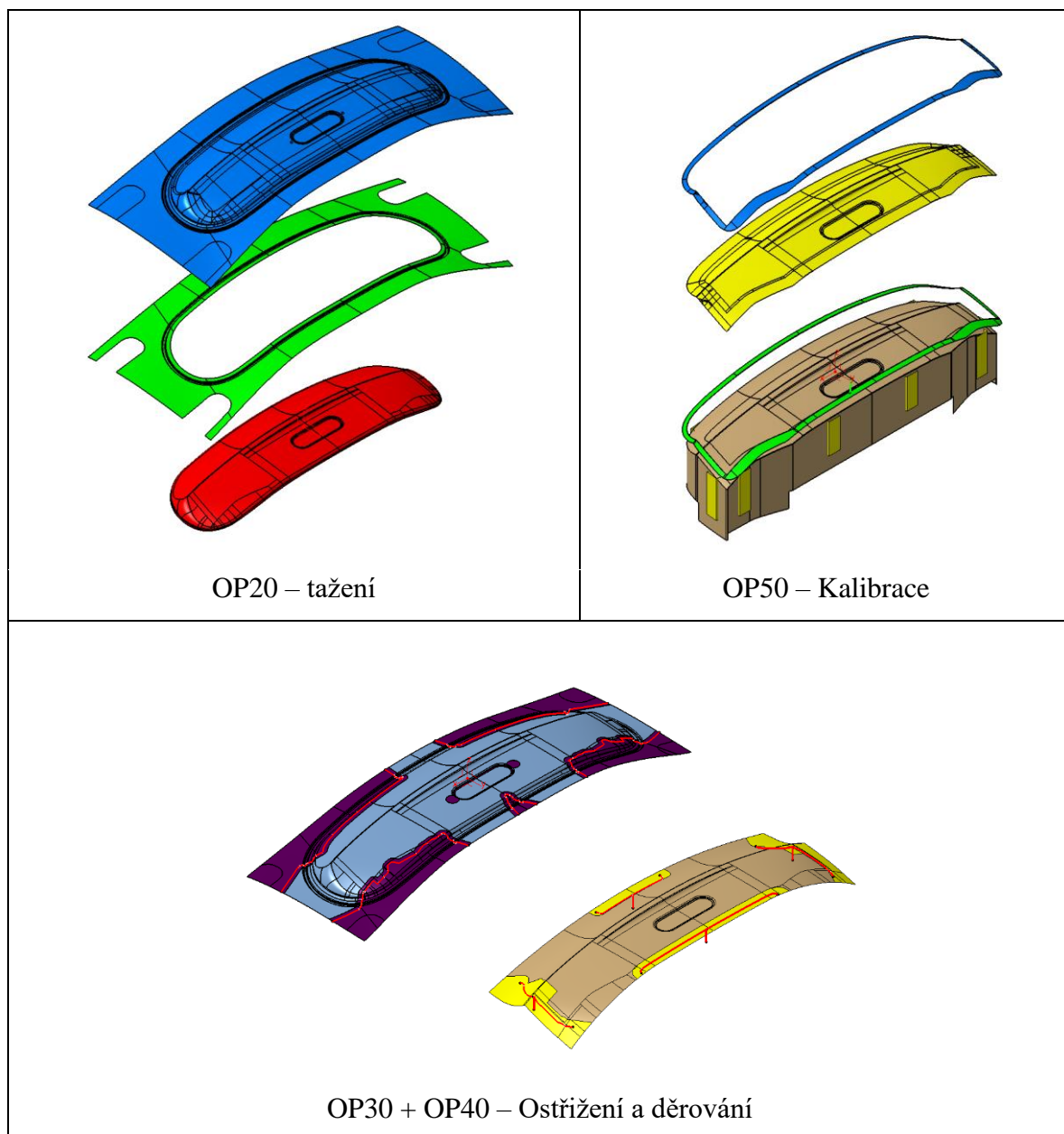
Zjednodušený metodický plán je uveden na obrázku 8-40. S ohledem na relativně nízkou technologičnost výlisku je díl lisován celkem ve 4 operacích:

OP20 – Tažení; OP30 – Stříh a děrování; OP40 – Stříh; OP50 – Kalibrace



Obrázek 8-40, Zjednodušený metodický plán

Numerická simulace byla provedena pomocí softwaru AutoForm Forming R8 s kvalitou nastavení „FV“, viz tabulka 7-1. Nástroje použité v numerické simulaci jsou uvedeny na obrázku 8-41.



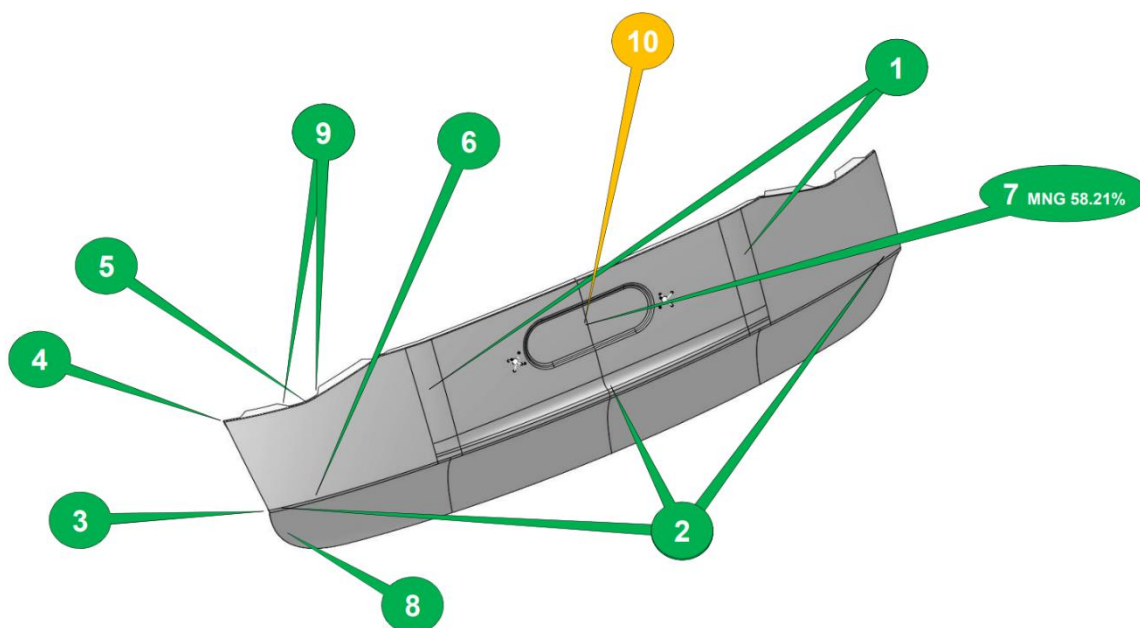
Obrázek 8-41, Geometrie nástrojů použité ve finální numerické simulaci

8.5.1 Hodnocení výrobitelnosti dílu

S ohledem na výsledek dílčích numerických simulací bylo diskutováno celkem 10 bodů výrobitelnosti. Identifikované problémy související s geometrií dílů není možné odstranit pomocí technologických parametrů (vzhledem k tvářitelnosti materiálu a omezený počet tvářecích operací), případně je jejich odstranění podmíněno významným nárůstem finančních nákladů na výrobu lisovacích a lemovacích nástrojů. Vyplněný kontrolní list numerické simulace je uveden v příloze č. 2 této práce. Seznam problémových bodů je uveden v tabulce 8-12 a zobrazen na obrázku 8-42.

Tabulka 8-12, Seznam problémových bodů ve výrobitelnosti

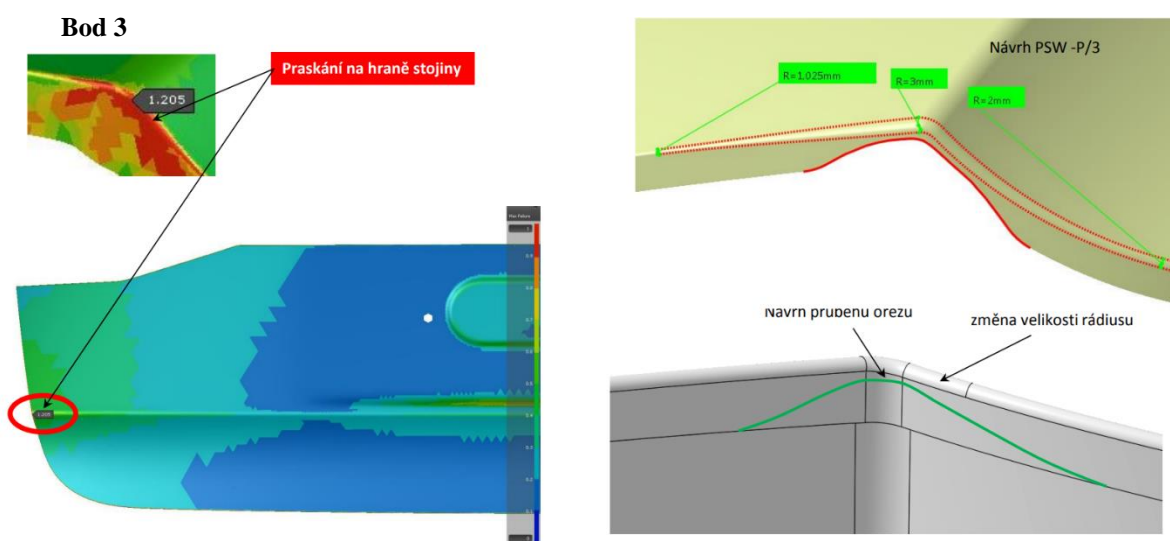
Problémový bod (výrobitelnost)	Popis
1+2	Designové provedení neodpovídá katalogu zásad pro konstrukci pohledových dílů (chráněno ŠKODA)
3	Porušení na hraně poloměru
4	Porušení na rohu výlisku v oblasti SBBR
5	Porušení ve stojině pod SBBR
6	Riziko přetažené hrany
7	Nižší MNG při použití materiálu DP500 proti běžnému produkčnímu materiálu CR4
8+9	Střížný úhel je větší než 15°
10	Díl z oceli DP500 vykazuje větší odpružení než v případě použití oceli CR4



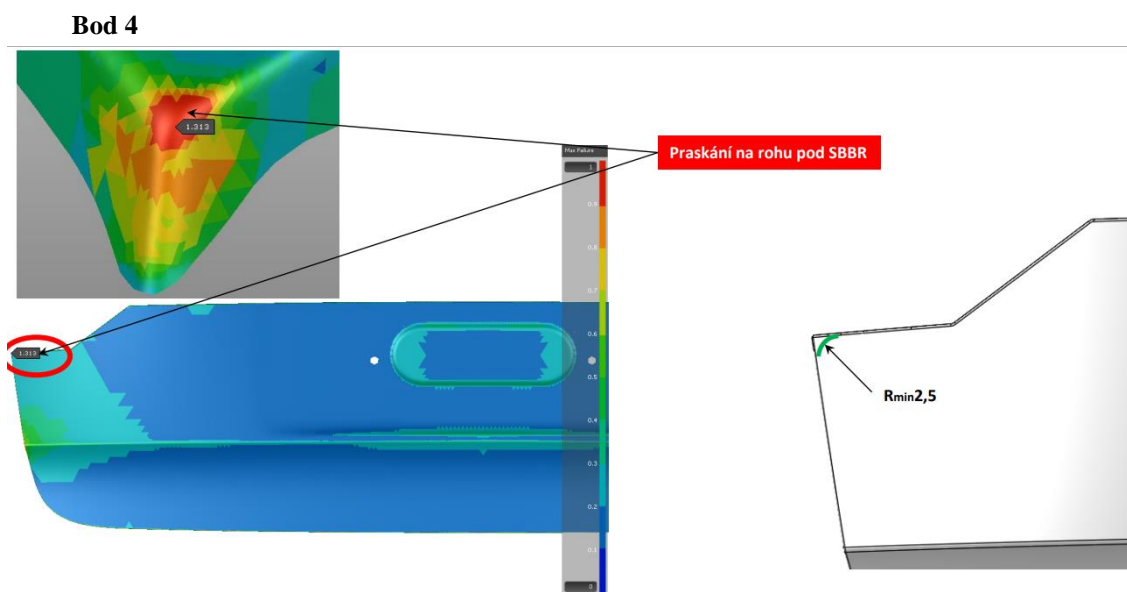
Obrázek 8-42, Finální geometrie dílů, po odstranění problematických bodů z výrobitelnosti

Vybrané body jsou graficky znázorněny na obrázcích 8-43 až 8-47. Společně s výsledkem numerické simulace je uveden i návrh na změnu geometrie či provedení dílu. Všechny navržené body byly přijaty a tvar dílu byl optimalizován. [19A]

Vzhledem ke skutečnosti, že je díl součástí sestavy, je nutné hodnotit vliv změn na celý tento uzel. Zásah do pohledových ploch je s ohledem na celkový design vozu výrazně omezen.

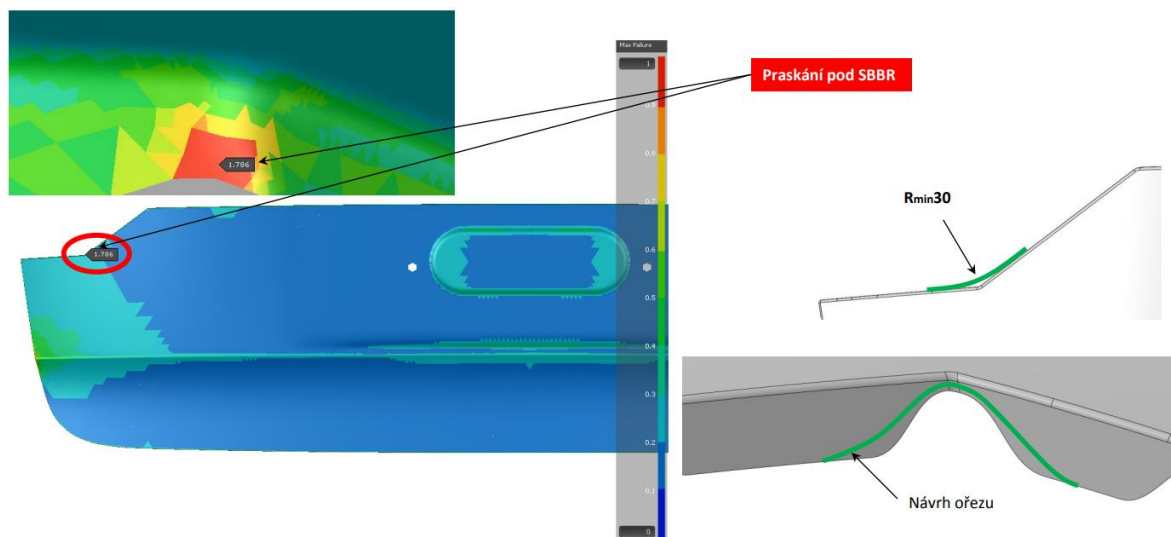


Obrázek 8-43, Bod 3, Porušení na rádiu: zvětšení poloměru a úprava průběhu orezu



Obrázek 8-44, Bod 4, Porušení na rohu pod SBRR: zvětšení půdorysného rádiu na $R_{min} 2,5$ mm

Bod 5



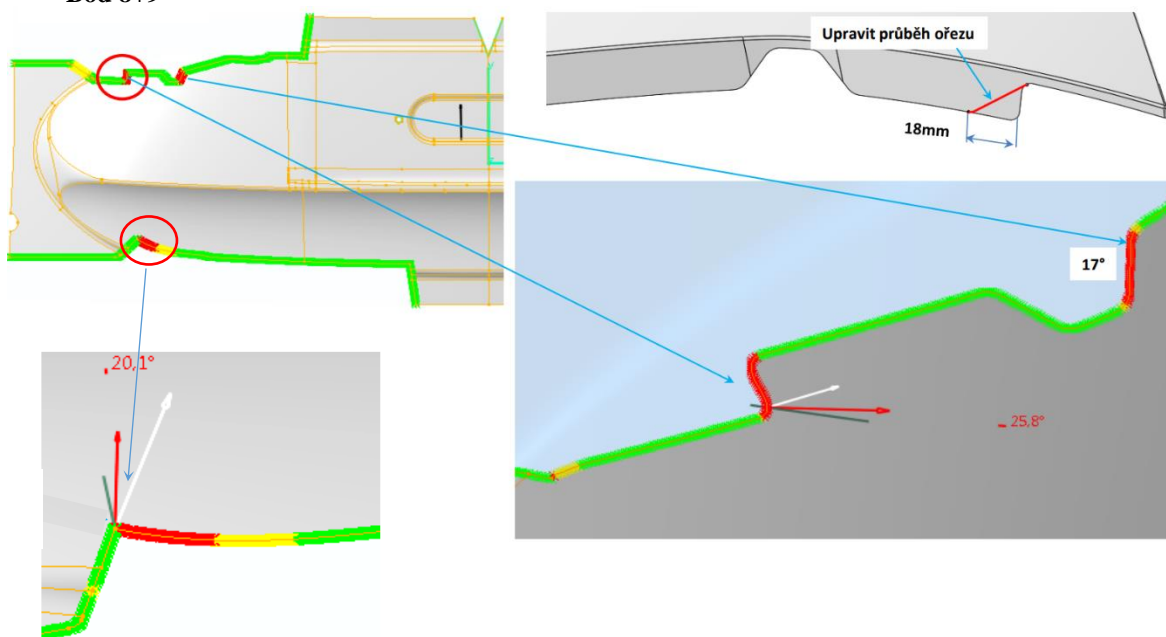
Obrázek 8-45, Bod 5, Porušení ve stojně pod SBBR: Zvětšit půdorysný rádius, zkrátit délku stojny

Bod 6



Obrázek 8-46, Bod 6, Riziko přetažené hrany při současném provedení

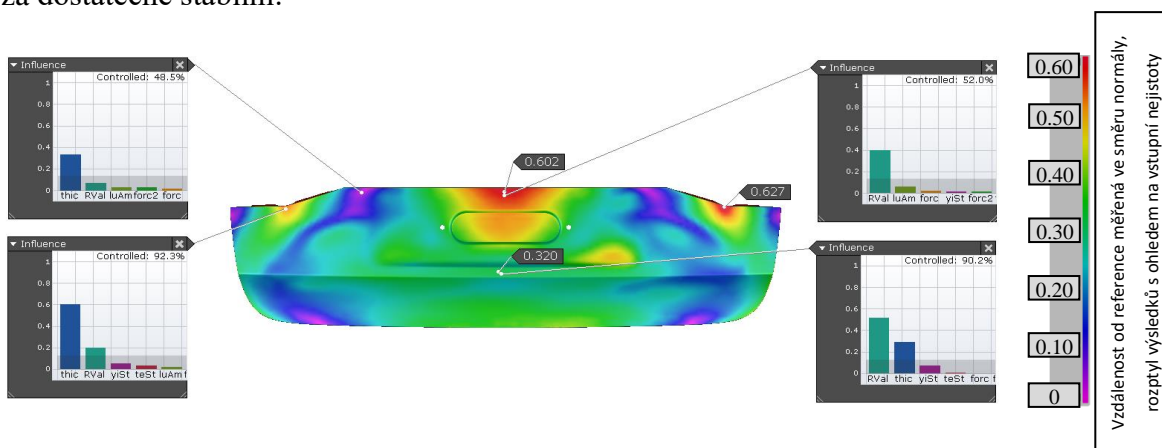
Bod 8+9



Obrázek 8-47, Bod 7, Střížný úhel je větší než 15°

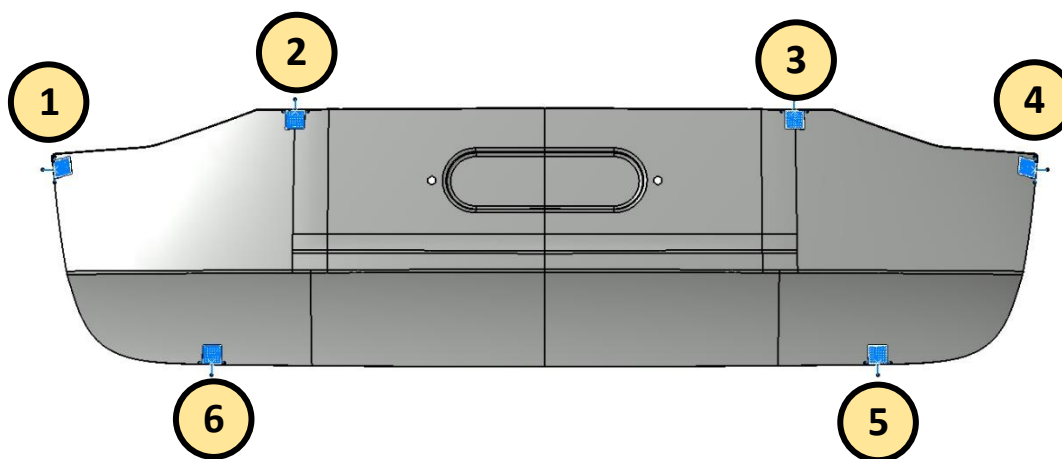
8.5.2 Robustnost procesu

Pro vyhodnocení stability odpružení byla provedena analýza robustnosti. Cílem analýzy je hodnocení rozptylu rozměru součásti s ohledem na tolerance vstupů do lisovacího procesu. Obrázek 8-48 reprezentuje výsledky odpružení založené na $\pm 10\%$ variaci mechanických vlastností, tloušťky plechu, síly přidržovače v tahové operaci a posuvu při založení nástřihu. Hodnoty rozptylu jsou založeny na zkušenostech odborníků ze společnosti ŠKODA AUTO a AutoForm Engineering Czech Republic. Limity specifikace odpružení ($\pm 0,80$ mm) nebyly na výlisku překročeny a tento výsledek je považován za dostatečně stabilní.



Obrázek 8-48, Rozptyl výsledků odpružení, analýza robustnosti

Robustnost odpružení je hodnocena pro plech upevněný v měřicím přípravku. Umístění RPS bodů a pořadí jejich zavírání je uvedeno na obrázku 8-49.



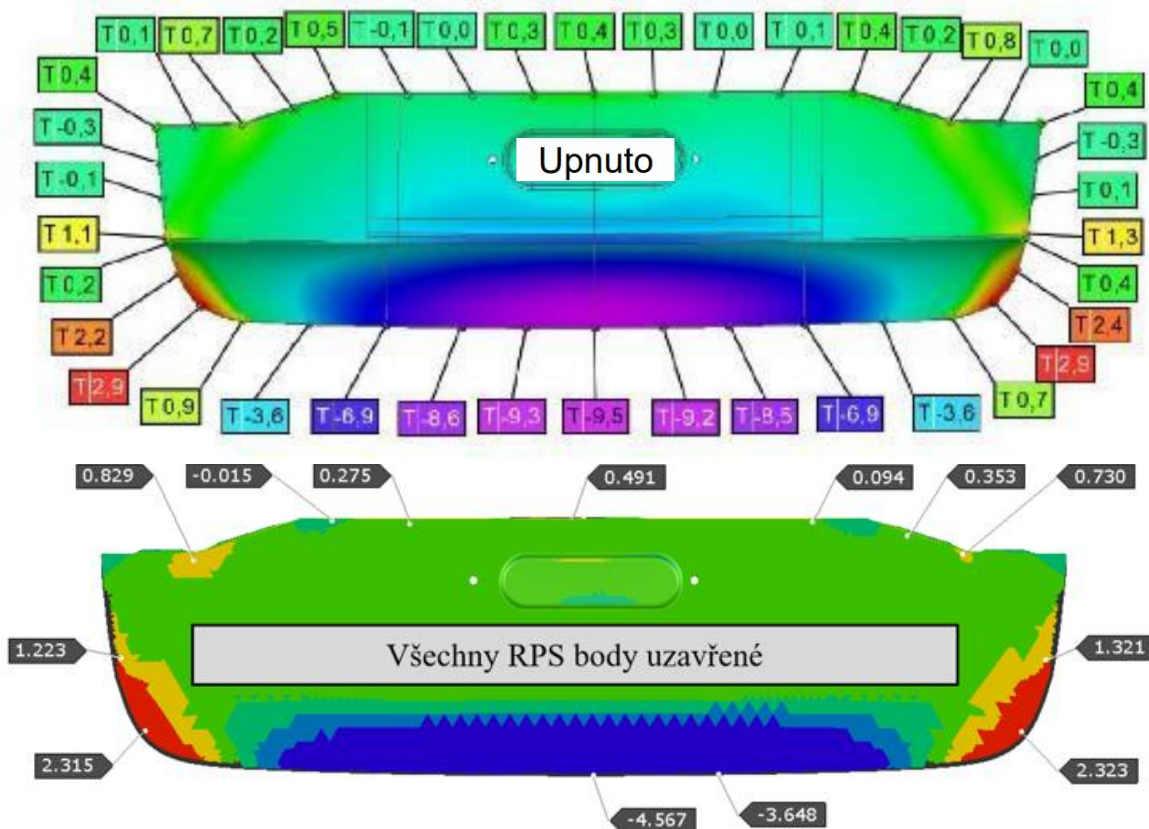
Obrázek 8-49, Pořadí uzavírání RPS bodů

8.5.3 Lisovací zkoušky na prototypovém nástroji

Zkoušky na prototypovém nástroji byly provedeny v nářadovně ŠKODA AUTO. Během lisovacích zkoušek na prototypovém nástroji byl sledován vznik porušení materiálu, tvorba zvlnění, tvorba propadů a dalších auditových vad. Významným bodem je současně i hodnocení rozměrovosti dílu, a tudíž i hodnocení shody s numerickou simulací.

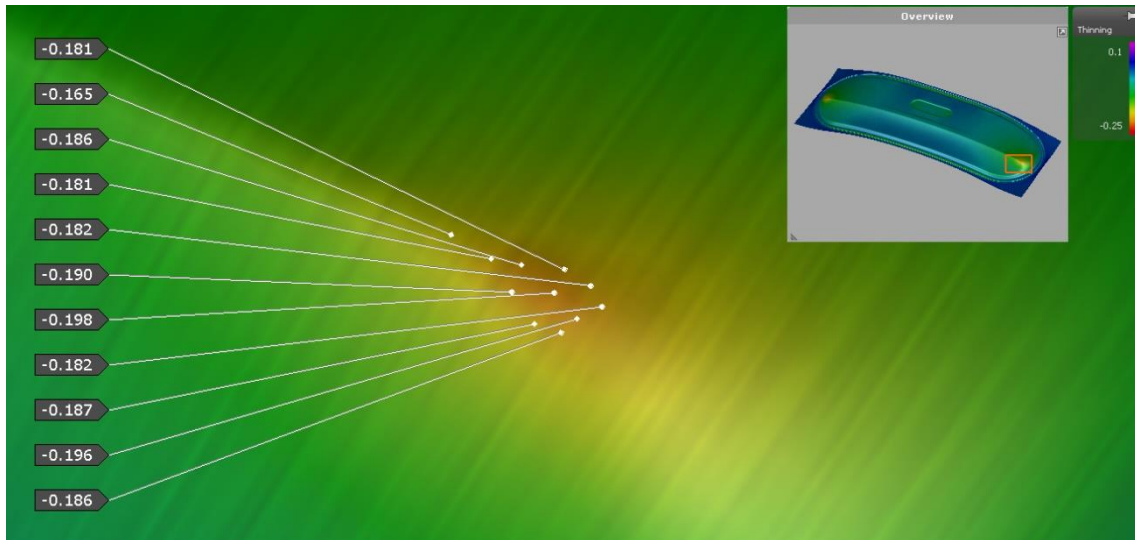
Výlisk proti numerické simulaci nevykazuje neočekávaný vznik porušení nebo zvlnění materiálu. Auditové hodnocení odpovídá předpokladům.

Shoda numerické simulace a výsledků lisovacích zkoušek je zobrazena na obrázku 8-50 a je dostačující (do 10 %) ve většině obvodových oblastí. Důvodem neshody ve spodní části výlisku je odlišné provedení prototypového nástroje vůči CAD datům (a tím i původní numerické simulace) a nedostatečná velikost přidržovací síly v této oblasti.

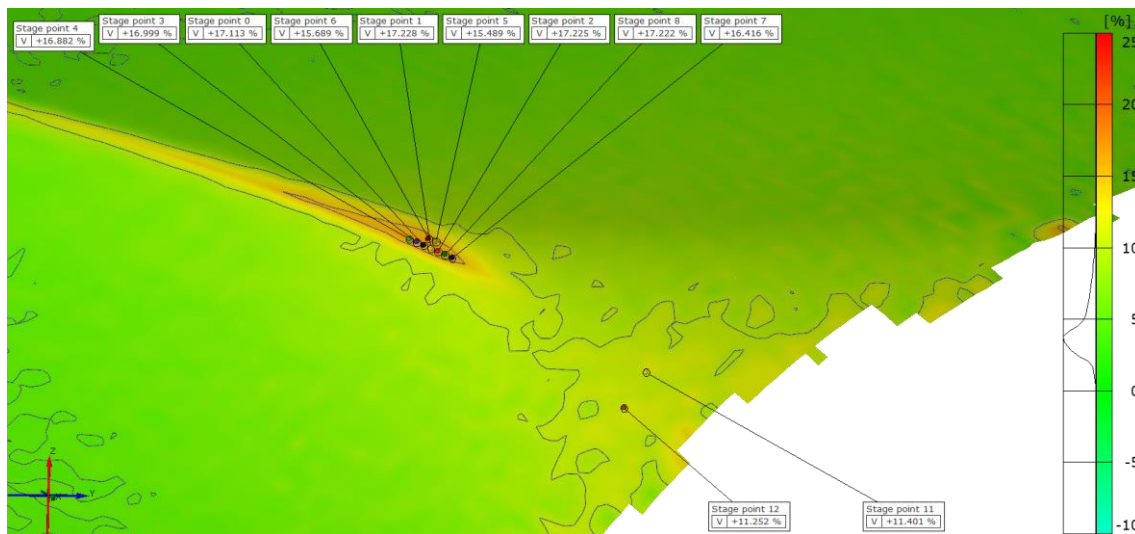


Obrázek 8-50, Výsledek odpružení, scan výlisku nahoře, výsledek numerické simulace dole

V rámci prototypových zkoušek byl pro hodnocení ztenčení plechu využit systém ARGUS. Míra shody s numerickou simulací v oblasti s nejvyšší mírou ztenčení je dostatečná (do 10%). Na základě prototypových zkoušek je možné modifikovat geometrii tažného nástroje a uvolnit data pro výrobu sériového nástroje. [19A, 20A]



Obrázek 8-51, Hodnoty ztenčení po tahové operaci, numerická simulace



Obrázek 8-52, Hodnoty ztenčení po tahové operaci, ARGUS



Obrázek 8-53, Tuširovací otisk v tažné operaci OP20

8.5.4 Lisovací zkoušky na sériovém nástroji

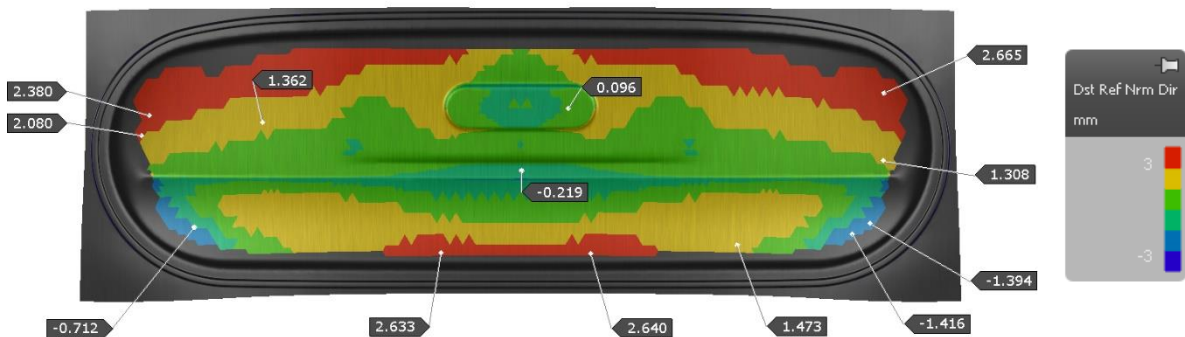
Přidržovací síla na sériovém nástroji je vyvíjena pomocí pneumatických pístů (součástí lisovací linky) a plynových pružin. Síla v průběhu zdvihu narůstá z 1136 kN na 1300 kN (800 kN písty + 336 až 500 kN, plynové pružiny). Na povrchu plechu je olej Anticorit PL 3802 39 LV(Fuchs) v množství 1,3-1,4 g/m². Lisovací takt je 8 zdvihů za minutu. Výchozí velikost nástřihu je 470 x 1400 x 0,55 mm.

Výlisek proti numerické simulaci nevykazuje neočekávaný vznik porušení nebo zvlnění materiálu. Auditové hodnocení odpovídá předpokladům. Hodnocení rozměrovosti dílů (realizované v nářadovně ŠKODA AUTO) je provedeno ve volném uložení na polystyrenovém bloku, viz obrázek 8-54. Rizikem této metody je možná asymetrie výsledků způsobená definicí Local Best Fit při pozicování naskenované sítě.

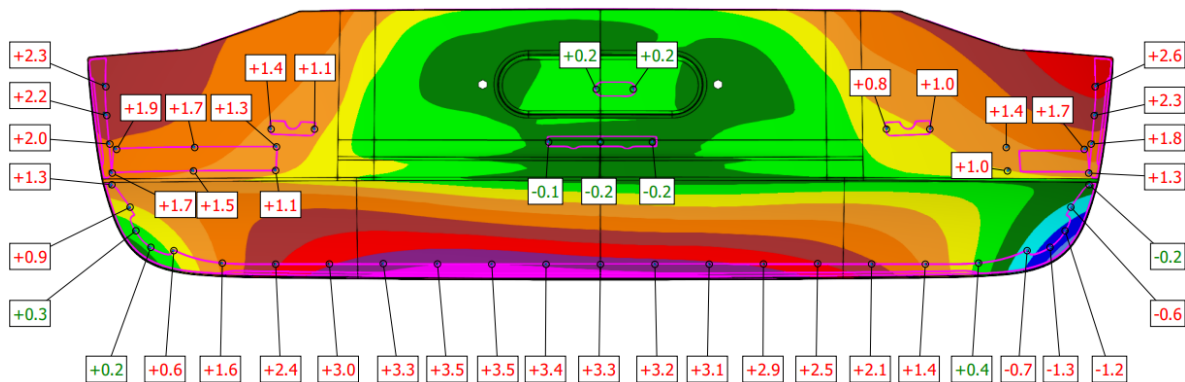


Obrázek 8-54, Měření rozměrů po tahové operaci, položení na polystyrenový blok

Míra shody numerické simulace je v případě sériového nástroje významně lepší než v případě nástroje prototypového. Kontrolní list numerické simulace je uveden jako příloha č. 2. Odchylky od požadovaného rozměru ale nesplňují předepsané tolerance ve vybraných oblastech, to je dáno absencí kompenzace odpružení. Důvodem pro absenci kompenzace jsou náklady a riziko spojené s dodatečnou modifikací již kompenzovaného nástroje. S ohledem na prvotní použití materiálu DP500 bylo přistoupeno k variantě, kdy bude první korekce nástroje provedena až po vylisování zkušební série výlisků. Škála mezi výsledky numerické simulace a výstupu měření reálného výlisku není synchronizována. SW AutoForm Forming nabízí pouze omezené možnosti v rámci editaci barevné škály. [19A]



Obrázek 8-55, Výsledek odpružení po tahové operaci, numerická simulace

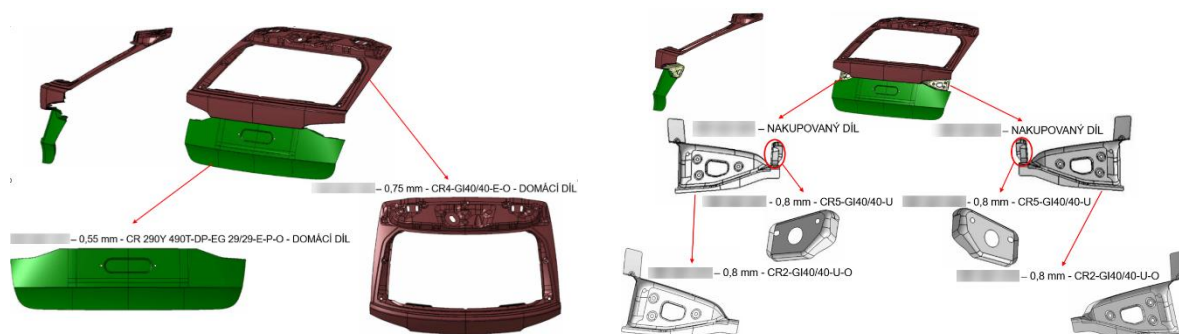


Obrázek 8-56, Výsledek odpružení po tahové operaci, scan ATOS III+ MV700

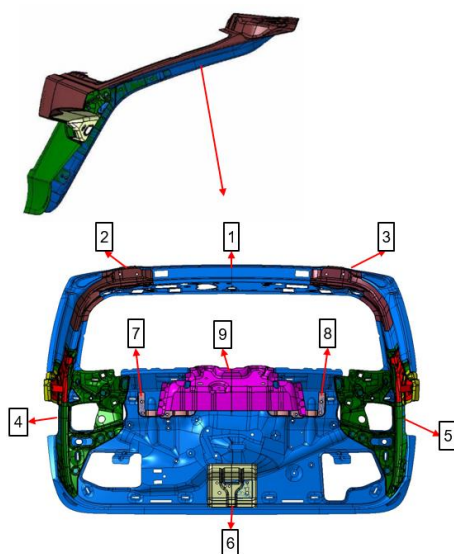
S ohledem na získané výsledky odpružení (obrázek 8-56) je navazujícím krokem kompenzace nástroje. Metoda kompenzace je identická jako v případě běžně používané nízkouhlíkové oceli. Z důvodu chráněné metodiky kompenzace odpružení ve společnosti ŠKODA AUTO není postup kompenzace odpružení v této práci uveden.

8.5.5 Sestava pátých dveří

Sestava pátých dveří čítá celkem 16 samostatných výlisků. Seznam jednotlivých dílů a jejich pozice v sestavě je uveden na obrázku 8-57 a 8-58. Sledovaný díl HKau je spojován s podsestavou obsahující vnější horní díl pátých dveří pomocí laserového pájení. Podsestava vnějších a vnitřních pátých dveří je spojena metodou lemování (v kombinaci s lepením).



Obrázek 8-57, rozpad dílů pro sestavu vnějších pátých dveří



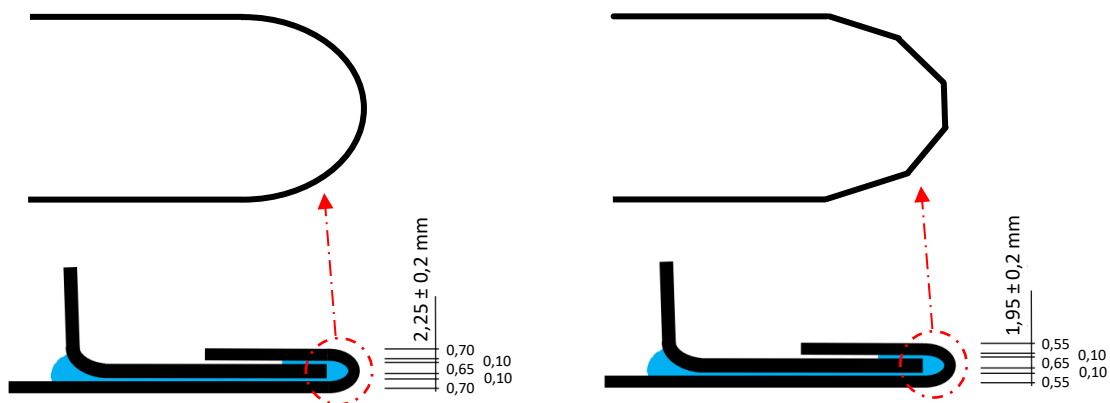
1) 5E7.827.159 – DOMÁCÍ DÍL

NAKUPOVANÉ DÍLY:

- 2) 5E7.827.177
- 3) 5E7.827.178
- 4) 5E7.827.169
- 5) 5E7.827.170
- 6) 5E7.827.173
- 7) 5E7.827.141
- 8) 5E7.827.142
- 9) 5E7.827.219

Obrázek 8-58, Rozpad dílů pro sestavu vnitřních pátých dveří

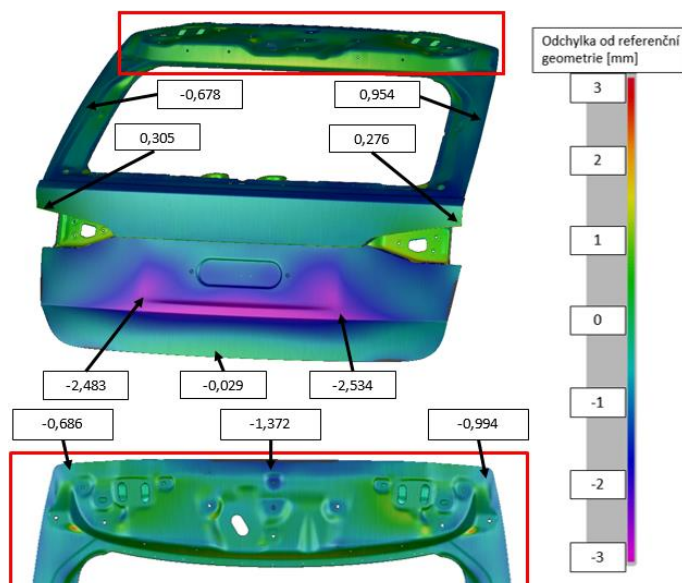
Vlivem vyšších pevnostních vlastností oceli DP500 proti nízkouhlíkovým ocelím je i k lemování dílů potřeba větších sil. Tuto skutečnost je potřeba zohlednit vůči silovým kapacitám lemovacích robotů a linek. S ohledem na nižší tloušťku plechu se navíc projevuje tendence ztráty stability při ohybu a ke vzniku zlomů na vnější straně lemu, viz obrázek 8-59. [19A, 21A, 22A]



Obrázek 8-59, provedení lemového spoje s vnějším plechem z oceli CR4 (vlevo) a oceli DP500 (vpravo) se schematickým vyjádřením ztráty stability při ohybu

V rámci nasazení oceli DP500 byly u tohoto projektu sledovány i zmíněné navazující procesy. Výsledek korozních zkoušek, přilnavosti lepidel, laserového pájení a kvality lakování sestavy (provedený oddělením kvality ve společnosti ŠKODA AUTO, a.s.) získal stejný bodový výsledek jako v případě provedení s běžným sériovým materiálem CR4. Tyto zkoušky nejsou přímým předmětem disertační práce.

Odpružení kompletní sestavy pátých dveří pro model Octavia IV. generace, včetně všech vnitřních dílů, je znázorněno na obrázku 8-60.

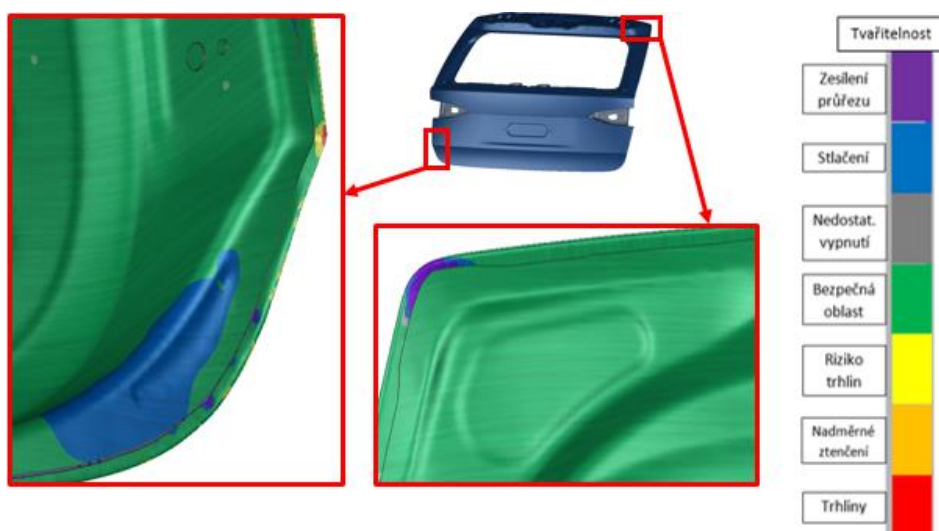


Obrázek 8-60, Numerická simulace sestavy, rozměrovost plné sestavy

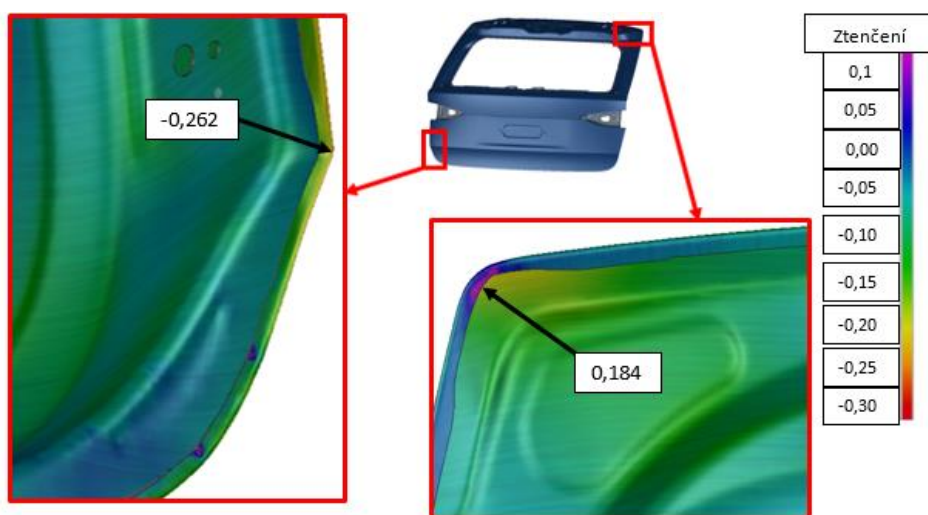
Dodávané vnitřní díly jsou definovány jako tuhá tělesa, protože výstupy z numerické simulace nejsou součástí dodávky dílů. Z tohoto důvodu nelze simulaci celé sestavy pátých dveří plnohodnotně porovnat s výsledkem skutečného výrobního procesu.

Simulace sestav je aktuálním předmětem zájmu většiny výrobců automobilů. Metodika práce se sestavami plechových dílů zaměřenými na rozměrovost ale dosud není v těchto společnostech plně rozvinuta.

Společně s rozměry je hodnoceno i riziko porušení, resp. ztenčení, viz obrázek 8-61 a 8-62. Veškeré vstupy do numerických simulací sestav by měly vždy obsahovat informace o přetvoření a zbytkovém napětí v jednotlivých elementech. Pouze v těchto případech lze relevantně hodnotit například riziko porušení při lemování dílu. [10A, 19A, 23A]



Obrázek 8-61, Analýza numerické simulace sestavy se zaměřením na lemované oblasti s nejvyšším rizikem porušení a zvlnění



Obrázek 8-62, Analýza numerické simulace sestavy se zaměřením na lemované oblasti s nejvyšším rizikem porušení a zvlnění, hodnoty ztenčení

8.5.6 Výsledky, dílčí závěr

Na základě hodnocení problémových bodů pro vybraný výlisek byla optimalizována geometrie dílu. Vlivem nižší tažnosti oceli DP500 (v porovnání s jinak běžně používaným materiálem CR4) je nutné upravit ořezové křivky a půdorysné poloměry na dílu tak, aby nedocházelo k jeho porušení. Na základě výsledku lisovacích zkoušek na prototypovém nástroji (hodnocení: porušení materiálu, tvorba zvlnění a propadů, dalších auditové vady, rozměrovost dílu), kdy díl splňuje předepsaná kritéria, lze validovat numerickou simulaci (vycházející z kontrolního listu uvedeného v příloze č. 2). Tento kontrolní list lze tedy využívat při návrhu dalších pohledových dílů automobilové karoserie.

V rámci dílčího závěru lze konstatovat, že vlivem vyšší pevnosti oceli DP500 dochází k vyšší míře odpružení. Současně je potřeba vždy geometrii dílu a lisovací nástroj konstruovat s ohledem na tuto skutečnost. Použitelnost oceli DP500 (se sníženou tvářitelností) je významně podmíněna typem povrchového výlisku automobilové karoserie. Důsledkem zvýšené pevnosti jsou současně vyšší reakční síly (tažná, přidržovací, střížná) v rámci lisování. Tato skutečnost musí být zohledněna při výběru lisu.

Aktuálním předmětem zájmu je současně přesah simulací tváření do simulací navazujících procesů. Na základě numerické simulace je možné již v nehmotné fázi výroby lisovacího a lemovacího náradí hodnotit rozměrovost sestav. Díky tomu je možné např. upravit umístění a typ spojovacích bodů a současně tolerance na vybraných plochách. U oceli DP500 se s ohledem na nižší tloušťku plechu projevuje tendence ztráty stability během lemování. [8A, 10A, 17A, 19A]

Vzhledem k ověření kontrolního listu u prototypového nástroje, byla uvolněna data pro výrobu sériového lisovacího nástroje. Materiál DP500 je z pohledu ŠKODA AUTO uvolněn pro použití v budoucích projektech. Předmětný díl, vyráběný z oceli DP500, je v současnosti sériově nasazen na voze ŠKODA OCTAVIA COMBI, 4. generace.

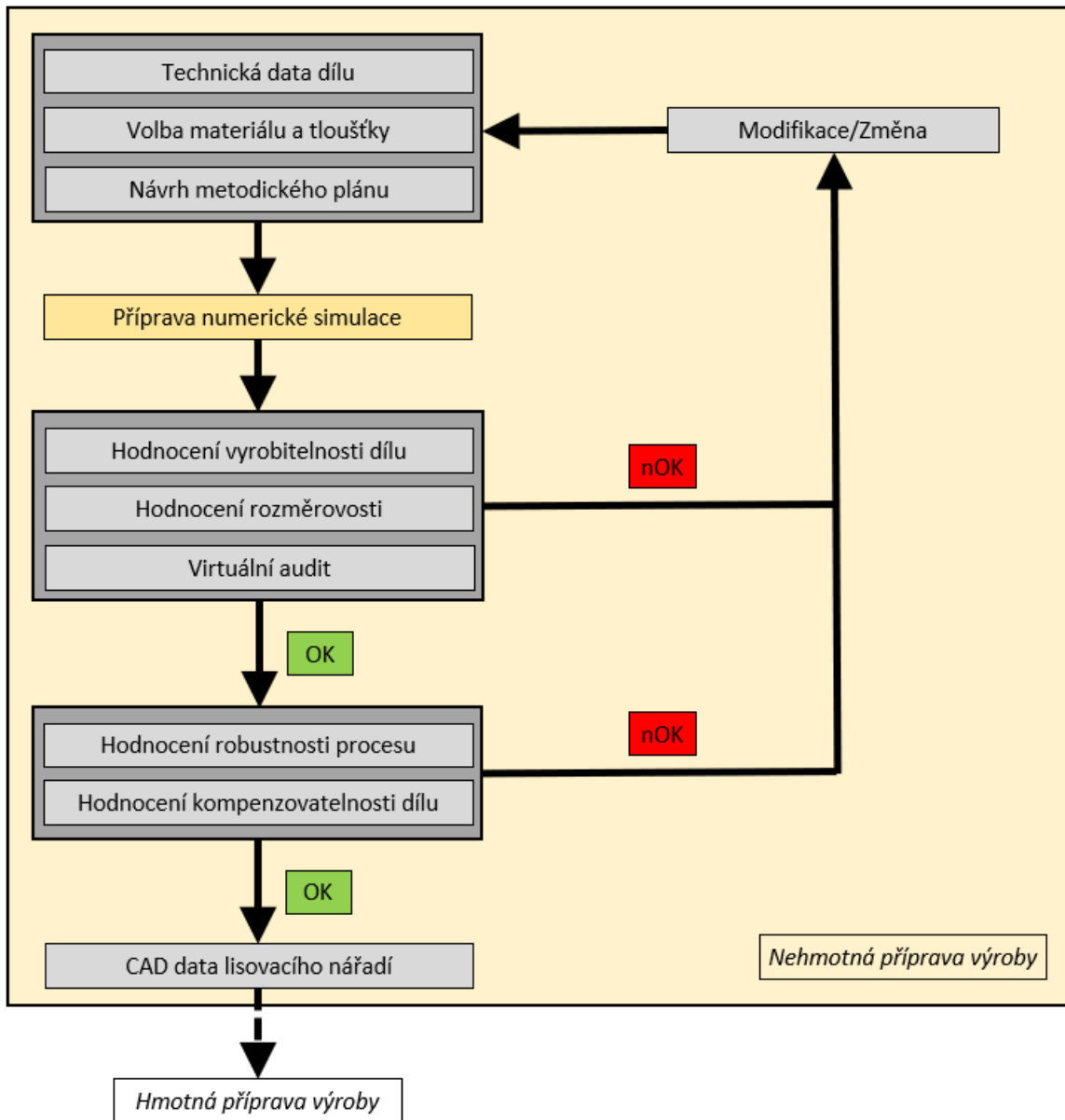
9 Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření

Hlavním cílem disertační práce je navržení metodiky pro nasazení vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie. V předchozích kapitolách byly popsány okrajové podmínky, které významně ovlivňují přesnost výsledků numerické simulace. Právě nehmotná příprava výroby je zásadní součástí této metodiky. Kontrolní list numerické simulace uvedený v následujícím textu zahrnuje podmínky a nastavení, které jsou klíčové s ohledem na současný stav poznání. Předpokladem pro úspěšné nasazení vysokopevnostních materiálů je právě dodržení logického postupu stanoveného v metodice a využití kontrolního listu numerické simulace. Cílem metodiky je, na základě nasazení vysokopevnostních materiálů, zvýšení užité hodnoty dílů a současně i dosažení finančních úspor. Metodika je rozdělena na část nehmotné (obrázek 9-1) a hmotné přípravy výroby (obrázek 9-2).

Nehmotnou přípravu výroby lze charakterizovat především možností významné modifikace tvarových ploch a procesních parametrů s významně nižšími finančními dopady než v hmotné fázi přípravy. Modifikace technických dat dílu je u automobilové karoserie možná především oblastech, které neovlivní pohledové plochy dílu (stanovené celkovým designem vozu). V případě, kdy analýza porušení materiálu přesáhne předepsaných limitů, je současně možné rozhodovat o jakosti materiálu použité pro výrobu dílu či o počtu lisovacích operací. Klíčovým nástrojem pro analýzu vyrobiteľnosti, rozměrovosti a virtuální audit je právě numerická simulace. Přesnost numerické simulace je přitom významně ovlivněna nastavením okrajových podmínek.

Lisovací proces je ovlivňován řadou nejistot (kap. 5.2.1). Uvolnění dat pro výrobu lisovacího nářadí by tedy mělo předcházet hodnocení robustnosti výroby dílu. Úzce souvisejícím tématem je i kompenzovatelnost odpružení (kap. 2.1). Klíčovým faktorem pro kompenzovatelnost není nominální hodnota odpružení ve vztahu k cílové geometrii, ale variace těchto hodnot právě ve vztahu ke vstupujícím nejistotám.

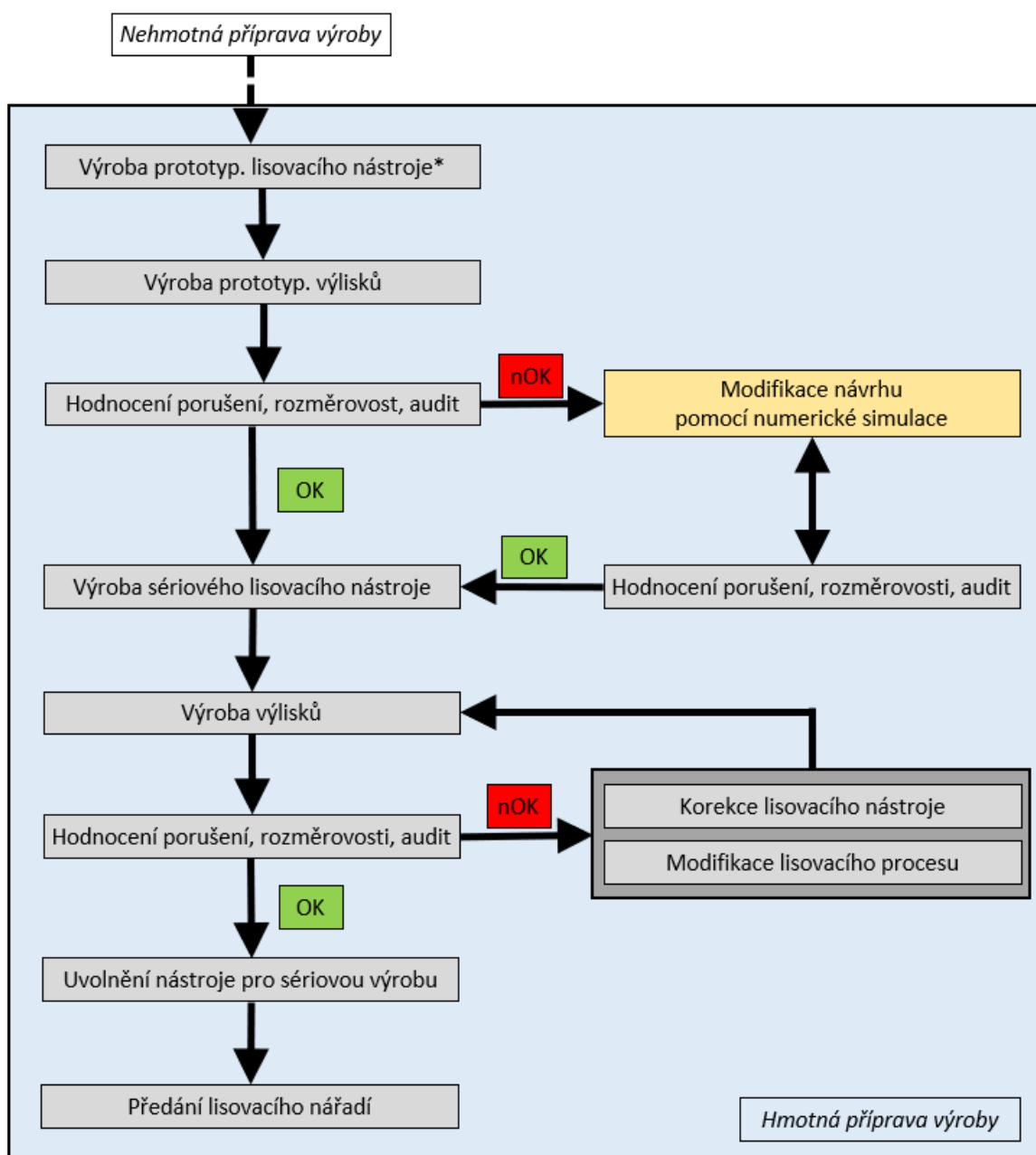
V případě nesplnění podmínek definovaných pro sledovaný díl (v levém sloupci na obrázku 9-1) je možné proces modifikovat. Virtuální modifikace procesu přináší významné finanční a časové úspory v porovnání s fyzickými korekcemi na lisovacím nářadí.



Obrázek 9-1, Metodika, nehmotná příprava výroby [21A]

Výroba prototypového lisovacího nástroje je zpravidla podmíněna tvarovou složitostí či počtem inovací pro konkrétní díl. Na základě výsledků prototypových zkoušek je možné dodatečně optimalizovat data nástroje, a to především v případě, kdy dochází k porušení vylisku či významné neshodě v rozměrovosti dílu.

V případě problematické výroby na sériovém nástroji pak numerická simulace (s použitím kontrolního listu v následující kapitole) může poskytnout rychlý virtuální návrh modifikací na lisovacím nástroji, aby došlo k odstranění závad na vylisku. V této fázi lze již využít např. skenovaných dat nástroje. Současně lze pomocí numerické simulace hodnotit vliv předkládaných korekcí před započítáním fyzické modifikace lisovacího nástroje. [21A]



Obrázek 9-2, Metodika, hmotná příprava výroby [21A]

9.1 Kontrolní list numerické simulace

Hodnocení lisovatelnosti dílu je prováděno pomocí numerické simulace v softwaru AutoForm Forming R6 a Forming R8. Poznatky diskutované v předchozích kapitolách (kap. 7 a kap. 8) byly společně se zkušenostmi s lisováním dílů zapracovány do kontrolního listu numerické simulace. Vzhledem k rostoucímu podílu virtuální přípravy v CAD a CAM softwarech je na tento kontrolní list numerické simulace (v rámci nehmotné přípravy výroby lisovacího náradí) kladen vysoký důraz. Využití kontrolního listu pomáhá k vedení méně zkušených uživatelů simulačního SW a současně pomáhá eliminovat chyby spojené s nepozorností či nedbalostí.

V Tabulce 9-1 je uveden použitý přehled kontrolních bodů pro numerickou simulaci. Detailní přehled (s charakterizujícím komentářem pro jednotlivé body) pro vybraný díl a materiálovou jakost je uveden v příloze č. 2 této práce. [21A, 24A]

Tabulka 9-1, Přehled kontrolních bodů pro numerickou simulaci

1	Výchozí nastavení, import dat
1.01	Vytvoření nového simulačního souboru
1.02	Nastavení platných standardů (velikost elementů, definované profily brzdících drážek apod.)
1.03	Vyplnit a potvrdit data projektu (dílu)
1.04	Potvrdit platnou geometrii dílu (datový stav), jeho symetrii a souřadný systém
1.05	Ověřit, že geometrie není použita ve více lisovacích operacích (vícečetně)
1.06	Kontrola kvality ploch importované geometrie
1.07	Kontrola velikosti poloměrů na geometrii
1.08	Kontrola korektní definice těžiště nástroje, "Center of Die"
2	Materiálová karta
2.01	Výběr správné materiálové karty
2.02	Nastavení tloušťky materiálu
3	Nastavení metodického plánu
3.01	Potvrdit nastavení typu tažné operace, "Double / Single Action Draw"
3.02	Potvrdit počet a typ lisovacích operací a ověřit jejich značení/číslování
3.03	Kontrola střížných úhlů
3.04	Potvrdit aktivaci mezioperačního odpružení
3.05	Kontrola souřadného systému pro jednotlivé operace
4	Nástřih (blank)
4.01	Zkontrolovat konturu nástřihu
4.02	Ověřit správné nastavení směru válcování, "Blank Roll Angle"
4.03	Potvrdit symetrii pro definici nástřihu
5	Definice procesu
5.01	Ověřit nastavení referenční plochy nástrojů (horní / spodní)
5.02	Ověřit nastavení zdvihu lisu, "Press Stroke"
5.03	Ověřit nastavení třecích podmínek, "Lube"
5.04	Ověřit případné nastavení tlakové závislosti, "Pressure Dependency"
5.05	Potvrdit nastavení předehtnutí nástřihu, "Pre-Bending" v OP20
5.06	Prověřit duplicitu nastavení mezioperačního odpružení
5.07	Ověřit nastavení "Scaling of Tools"
5.08	Ověřit nastavení kinematiky přidržovacího systému
5.09	Ověřit nastavení sil a tlaků přidržovacího systému
5.10	Zkontrolovat výběr oblast bez otisku, "No-Bearing Area"
5.11	Ověřit zvolený model brzdících drážek, "Drawbead Model"
5.12	Kontrola použití "Flattening" / "Unflattening"

5.13	Potvrdit použití středících kolíků, "Pilot Group"
5.14	Potvrdit aktivaci stříhu včetně přidržení, "Cutting with Tools"
5.15	Potvrdit aktivaci zakládání plechu, "Locating/Gravity at Beginning of OP"
5.16	Zkontrolovat kinematiku lisovacích nástrojů
6	Finální měřicí operace
6.01	Potvrdit nastavení operace odpružení, "Real Measurement"
6.02	Potvrdit nastavení středičů a upínek, "Pilots and Clamps"
6.03	Potvrdit definici pořadí zavírání upínek, "Clamps closing"
6.04	Zkontrolovat rozměr středičů, "Pilots"
6.05	Potvrdit nastavení referenční geometrie
7	Nastavení výpočtu
7.01	Ověřit nastavení parametrů výpočtu, "Control Parameters"
7.02	Před uvolněním dat provést výpočet s použitím "Final Validation"
7.03	Zkontrolovat nastavení sítě u "Tool and Sheet Mesh"
8	Kontrola výpisu simulace (log)
8.01	Provéřit kinematiku nástrojů z pohledu penetrace, "Tool Penetration"
8.02	Provéřit log numerické simulace, "Warnings / Errors"
8.03	Zkontrolovat celkový počet iterací
9	Analýza výsledků
9.01	Vizuálně prověřit zakládání nástříhu v každé OP
9.02	Vizuálně prověřit pohyb nástříhu během zavírání nástrojů
9.03	Provéřit nechtěné deformace při zavírání nástrojů
10	Porušení materiálu
10.01	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Formability" (kategorizace MKP sítě)
10.02	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Thinning" (ztenčení plechu)
10.03	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Max Failure" (poloha elementů vůči FLC)
11	Zvlnění
11.01	Vizuálně vyhodnotit vznik zvlnění v celé ploše dílu
11.02	Vyhodnotit vznik vln s použitím analýzy pro křivost sítě i stav napětí
12	Vtažení
12.01	Provéřit vtažení plechu v OP20 (s ohledem na brzdicí drážku)
12.02	Potvrdit provedení optimalizace vtažů a nástříhu
13	Přetažená hrana
13.01	Provéřit nastavení analýzy přetažených hran, "Skid Lines"
13.02	Vyhodnotit přetažené hrany s využitím kontaktního tlaku a narovnávání plechu
14	Odpružení
14.01	Provéřit nastavení orientace reference, "Reference Orientation"
14.02	Vyhodnotit díl z pohledu odpružení
15	Kvalita povrchu
15.01	Vyhodnotit kvalitu povrchu s ohledem na propady, "Surface Lows"
15.02	Vyhodnotit kvalitu povrchu metodou virtuálního pravítka, "Three-Point-Gauging"
16	Hodnocení sil
16.01	Provéřit automatické navyšování přidržovací síly
16.02	Provéřit výsledky silového zatížení, "Forces" (odpovídá použitému lisu/lisovací lince)

10 Diskuze dosažených výsledků

Předložená disertační práce se ve svém úvodu zabývá pojmy souvisejícími s lisováním vnějších pohledových dílů automobilové karoserie. Blíže vysvětleny jsou také metody použité v experimentální části práce. Současný stav poznání je založen na dostupných publikacích souvisejících s tématem lisování vysokopevnostních ocelí a použití numerické simulace pro technologii plošného tváření za studena.

Motivací práce je nahrazení současně používaných hlubokotažných materiálů (s mezí pevnosti do 400 MPa) za materiály s příznivějším poměrem pevnosti a měrné hmotnosti s cílem redukovat hmotnost automobilové karoserie. V důsledku přísnějších emisních limitů lze předpokládat, že problematika snižování hmotnosti karoserie vozidel bude v následujících letech nabývat na důležitosti. Nasazení těchto ocelí musí být ověřováno již v rámci nehmotné přípravy výroby. Kvůli finanční náročnosti výroby lisovacích nástrojů není možné ověřovat vyrobiteľnost potenciálních materiálůvých šarží pouze pomocí lisovacích zkoušek.

Klíčovým nástrojem v rámci nehmotné přípravy výroby je numerická simulace, na kterou je kladen důraz v předložené metodice (kap. 9). Přesnost numerické simulace je významně ovlivněna jejími okrajovými podmínkami. Pro dosažení dostatečně spolehlivého návrhu, je tudíž nutné udržet krok s aktuálním stavem poznání a nejmodernějšími technologiemi. Platí, že okrajové podmínky numerické simulace musí být nastaveny s ohledem na skutečné budoucí provedení lisovacího nástroje. Současně by pak i výroba lisovacího nástroje měla korespondovat s podmínkami v numerické simulaci. V případě nesplnění těchto podmínek dochází ke snížení přesnosti numerické simulace. Využití kontrolního listu (kap. 9.1, příloha č.2) napomáhá vedení méně zkušených uživatelů a současně pomáhá eliminovat chyby spojené s nepozorností či nedbalostí.

Významné rozdíly mezi výsledky numerické simulace z pohledu analýzy odpružení lze najít především mezi elementy typu „membrane“ (CE) a „shell“ (CE+, FV), viz kapitola 7.1. Výsledky numerické simulace s využitím membránového elementu, spolu s hrubým nastavením sítě, se jeví jako nepřesné. Tyto simulace jsou vzhledem k nižšímu výpočetnímu času vhodné především v prvotních fázích projektu, které jsou zaměřené na identifikaci kritických oblastí výlisku s ohledem na jeho porušení. Výchozí velikost konečno-prvkové sítě má v tomto případě na výsledek menší vliv než typ použitého elementu. Vyplyvající poznatky odpovídají předpokladu a korespondují se závěry publikovanými v literatuře [8, 9, 107, 108].

Numerické simulace využívající konstantní koeficient tření vykazují v případě geometrických brzdících drážek (3D plocha v CAD datech nástroje) nadhodnocené porušení (kap 7.2). Pro dosažení dostatečné shody je nutné pracovat s koeficientem třením závislým na kontaktním tlaku nebo s takovým modelem, který zohledňuje (společně s hodnotou kontaktního tlaku) i hodnotu přetvoření materiálu, teplotu a relativní rychlost posuvu nástroje a plechu. Tento výsledek [9A, 10A] odpovídá zjištěním uvedeným v odborné literatuře [113-116]

Rozdíly mezi výsledky numerické simulace mohou být způsobeny odlišným pořadím při sevření v měřicích bodech [4A, 14A]. Změny rozměru se s ohledem na výše zmíněné mohou lišit až o 20 %. (kap 7.3) Numerická simulace by proto vždy měla respektovat pořadí uzavíraných bodů v reálném měřicím přípravku, tyto závěry jsou uváděny i v [11, 103, 108]

S ohledem na přesah výsledků numerické simulace lisování do virtuálního hodnocení navazujících procesů, lze očekávat dodatečný růst jejich významu. V případě hodnocení sestav (rozměrovost) je z hlediska přesnosti predikce nutné, aby veškeré vstupující díly obsahovaly deformační a napět'ovou charakteristiku vyplývající z průběhu výroby. Lze předpokládat, že společně s fyzickým dílem bude v rámci dodání stále častěji vyžadován i virtuální model nesoucí zmíněné informace. Dále rozvíjeny musí být i metody pro porovnání výsledků numerické simulace a výsledků fyzických měření.

Ze závěrů uvedených v kapitole 8.1.4 a 8.2.4 lze konstatovat, že pro hodnocení přetvoření u vnějších pohledových dílů je nutné (s ohledem na sledovanou oblast) kombinovat jednotlivé metody pro vyhodnocování. K podobným závěrům dochází i [87, 89] Oblasti s malými rádií je možné hodnotit pomocí fotogrammetrických pouze v případě použití dostatečné jemné deformační sítě. Tato měření je přinejmenším vhodné podpořit přípravou metalografických výbrusů a měřením tloušťky. Při přípravě metalografických výbrusů však musí být kladena pozornost na místa, kde je vzorek odebírán, viz kapitola 8.2.3.

Sledovaný materiál DP500 (CR290Y490T-DP) vykazuje z hlediska zpracovatelnosti podobné chování jako hlubokotažné oceli CR4 a CR180BH. Zohledněna však musí být nižší tažnost, potřeba vyšší lisovací síly (tažná, přidržovací i střižná síla) a vyšší míra odpružení pro vysokopevnostní oceli. Identické skutečnosti jsou popsány v [78, 79, 100, 105]. Redukce odpružení však může být dosaženo např. proměnlivou hodnotou přidržovací síly, kterou lze dosáhnout využitím servolisů nebo plynových pružin aktivních pouze ke konci zdvihu a volbou vhodné metody kompenzace (v úzké spolupráci s virtuálním návrhem).

Potřeba vyšší lisovací síly může být překážkou (pokud je nárůst pevnostních vlastností významnější než redukce tloušťky vysokopevnostního materiálu) v případě, kdy je silová kapacita stroje vyčerpána již při použití oceli s nižší pevností než DP500. Vyšší míra odpružení u vysokopevnostních ocelí akcentuje potřebu digitálního návrhu (numerické simulace) v nehmotné fázi přípravy výroby lisovacího nástroje. Hodnoty mechanických vlastností materiálu mají zásadní vliv na výsledek numerické simulace (kap. 8.3.3), jak uvádí i [8, 9, 11]

Ověření použitelnosti oceli a hodnocení shody s numerickou simulací je v práci provedeno od technologicky jednodušších výlisků po složitější. Zkoušky uvedené v kapitole 9.1 až 9.4 prokázaly z hlediska lisovatelnosti možnost nasazení oceli DP500 pro povrchové díly. Před sériovým nasazením vybrané oceli je nutné současně ověřit možnosti spojování, lakování a korozní odolnosti (tyto zkoušky však nejsou předmětem zájmu disertační práce).

11 Závěr

11.1 Splnění cílů disertační práce

- **Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace**

V rámci literární rešerše byly vytipovány oblasti, na které je zaměřen vývoj související s numerickou simulací plošného tváření. Mezi sledované oblasti bylo zahrnuto: nastavení výpočetní sítě, tribologický model, problematika rychlosti deformace, hodnocení odpružení, definice nástrojů s ohledem na skutečné provedení nástroje a problematiku materiálových karet (kap. 7). V případě použití vysokopevnostní oceli s horšími plastickými vlastnostmi, dochází k redukci okna vyrobiteľnosti. Jednotlivé oblasti byly hodnoceny na základě současného stavu poznání v literatuře a ověřeny pomocí dílčích experimentů pro vnější pohledové díly automobilové karoserie. [4A, 6A, 8A, 9A, 11A, 13A, 14A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

- **Hodnocení vyrobiteľnosti vnějších dílů karoserie z vysokopevnostní oceli pomocí dílčích experimentů**

Hodnocení vyrobiteľnosti výlisků z oceli DP500 a hlubokotažných ocelí je v práci logicky řazeno od nejnižší po nejvyšší tvarovou složitost (kap. 8.1 až 8.4). Výsledky numerické simulace byly porovnávány vůči fyzickým výliskům. Hodnocení výlisků bylo provedeno pomocí bezkontaktních i kontaktních metod měření. Ověřeny byly dílčí body z předložené metodiky, resp. kontrolního listu numerické simulace. [1A, 14A, 15A, 16A, 17A, 18A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

- **Ověření navrženého postupu řešení pro vybraný vnější díl karoserie a materiálovou jakost**

Na základě výsledků numerické simulace byly navrženy geometrické modifikace dílu s cílem odstranění problémových bodů ve vyrobiteľnosti dílů. Společně s návrhem simulace lisování, jejím hodnocením a fyzickými zkouškami, je doplněn přesah do lemování a spojování dílů. V rámci disertační práce byla předložená metodika komplexně ověřena (kap. 8.5) pro použití vysokopevnostní oceli (DP500) pro výrobu pohledového dílu karoserie (páté dveře vnější spodní) pro vůz ŠKODA OCTAVIA COMBI, 4. generace. [10A, 17A, 19A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

- **Vytvoření kontrolního listu pro numerickou simulaci**

Na základě zjištění v rámci analýzy vlivu okrajových podmínek na přesnost numerické simulace byl vytvořen kontrolní list. Cílem předloženého kontrolního listu je zohlednit klíčové parametry pro numerickou simulaci do jejího návrhu. V kapitole 9.1 je uveden přehled těchto bodů, který je v rámci přílohy č. 2 doplněn o charakterizující komentář. [19A, 21A, 24A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

- **Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů automobilové karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření**

Hlavním cílem disertační práce je navržení metodiky pro nasazení vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie. Metodika obsahuje sekvenci kroků, které provázejí nasazení těchto materiálů. Klíčovou částí předkládané metodiky je nehmotná fáze výroby (obr. 9-1), která se zabývá kroky předcházejícími uvolnění CAD dat pro výrobu lisovacího nářadí. V této fázi je nutné správně předpovídat a hodnotit rizika spojená s výrobou výlisků. Kroky související s hmotnou přípravou výroby jsou uvedeny na obrázku 9-2. Nedílnou součástí předkládané metodiky je „Kontrolní list numerické simulace“ uvedený v kapitole 9.1. [21A, 24A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

11.2 Přínos disertační práce

Hlavním přínosem disertační práce je návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření (kapitola 9 a příloha č. 2) a současně i kontrolního listu numerické simulace (kapitola 9.1). Předložená metodika se zaměřuje na nehmotnou fázi výroby lisovacího nástroje a úzce souvisí s využitím numerické simulace. Diskutovány a ověřovány jsou okrajové podmínky, které jsou (s ohledem na současný stav poznání) klíčové pro zlepšení predikce numerických simulací (kapitola 7). Významnou částí je ověření navržené metodiky pomocí dílčích experimentů (kapitola 8). Zkoušky lisování pohledových dílů karoserie z vysokopevnostní oceli jsou doplněny o výstupy z numerické simulace. Ověřeno bylo chování vysokopevnostních ocelí při výrobě vnějších dílů karoserie. Demonstrovány experimenty mohou být analogicky využity i pro ověření nových perspektivních kovových slitin.

Účelem kontrolního listu numerické simulace (kap. 9.1) je eliminace chyb a zjednodušení, kterých při návrhu lisovacího procesu uživatelé softwaru dopouštějí. Využití kontrolního listu pomáhá k vedení méně zkušených uživatelů simulačního SW a současně pomáhá eliminovat chyby spojené s nepozorností, nedbalostí či nesprávnou definicí okrajových podmínek. Chyba vzniká na začátku výrobního řetězce (během numerické simulace lisování) přímo ovlivní digitální návrh navazujících procesů: spojování a lakování.

Disertační práce byla řešena ve spolupráci s průmyslovým partnerem ŠKODA AUTO, a.s. V rámci experimentální části práce byla využívána ocel DP500, která je použita pro lisování dílu vnějších spodních pátých dveří. Díky tomu bylo možné ověřit metodiku na reálném díle a materiálu, používaném v průmyslové praxi. Nasazení vysokopevnostních ocelí umožňuje další snižování hmotnosti karoserie či navýšení její tuhosti a pasivní bezpečnosti. Aplikace vysokopevnostních ocelí pro pohledové díly karoserie je ve společnosti plánována i pro budoucí projekty.

11.3 Návrh dalšího rozvoje

V rámci literární rešerše a poznatků získaných při řešení disertační práce, lze pozorovat další oblasti, na které by měly být zaměřeny výzkumné práce související s technologií plošného tváření za studena. Významným faktorem je vliv teploty na změnu deformačního chování materiálu i tribologických podmínek na rozhraní nástroj/plech. S ohledem na zlepšení predikce numerických simulací by měly tyto softwary danou skutečnost lépe reflektovat. Použití fotogrammetrie (metod DIC) ve zkušebnictví umožňuje přesněji definovat deformační chování materiálu, např. i ve vztahu k deformační dráze. Pro správnou predikci odpružení by měly být materiálové karty doplněny o popis kinematického zpevňování. In-line monitorování mechanických vlastností umožňuje kategorizaci dodaného materiálu (vykazuje rozptyl mechanických vlastností) tak, aby obsluha lisovacího stroje nemusela pro každou sadu svitků manuálně upravit procesní parametry lisu.

Zdrojem neshody mezi numerickou simulací a experimentálními výsledky může být rozdílný stav CAD dat a geometrie lisovacího nástroje. Výrobci softwaru pro numerickou simulaci by se měli zaměřit na jednodušší implementaci povrchu nástrojů (získaných pomocí 3D skenů) do numerické simulace, a to přímým nahrazením funkčních ploch nebo modifikací CAD dat. Současným trendem je využití výsledků numerické simulace pro hodnocení sestav lisovaných dílů, které by mělo být vzhledem k potenciální úsporám předmětem dalšího rozvoje.

S ohledem na finanční náklady spojené s výrobou lisovacích nástrojů (a jejich korekcí) a zkracování doby pro jejich návrh a výrobu, lze předpokládat další růst ve využití numerických simulací a digitálních technologií obecně.

Seznam použité literatury

- [1] ASM HANDBOOK 14B, Metalworking: Sheet Forming. ASM INTERNATIONAL. ISBN-13: 978-0-87170-710-9, 841 s.
- [2] Schuler GmbH, *Metal forming handbook*, Schuler. (1998). Springer. ISBN 978-3-540-61185-1, 573 s. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-58857-0>
- [3] Yoshida, F., Uemori, T. (2003). A model of large-strain cyclic plasticity and its application to springback simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 45(10), 1687-1702. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2003.10.013>
- [4] Solfronk, P., Sobotka, J., Kolnerová, M., Zuzánek, L. (2016). Influence of the computational models for the spring-back prediction at stamping. *Proceedings 25th Anniversary International Conference on Metallurgy and Materials*, 488-493. ISBN 978-80-87294-67-3
- [5] Eggertsen, P. -A., Mattiasson, K. (2011). On the identification of kinematic hardening material parameters for accurate springback predictions. *International Journal of Material Forming*, 4(2), 103-120. <https://doi.org/10.1007/s12289-010-1014-7>
- [6] Yoshida, F., Uemori, T., Fujiwara, K. (2002). Elastic-plastic behavior of steel sheets under in-plane cyclic tension-compression at large strain. *International Journal of Plasticity*, 18(5-6), 633-659. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00049-3)
- [7] Lee, J. -Y., Lee, J. -W., Lee, M. -G., & Barlat, F. (2012). An application of homogeneous anisotropic hardening to springback prediction in pre-strained U-draw/bending. *International Journal of Solids and Structures*, 49(25), 3562-3572. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.03.042>
- [8] Wagoner, R. H., Lim, H., Lee, M. -G. (2013). Advanced Issues in springback. *International Journal of Plasticity*, 45, 3-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2012.08.006>
- [9] Burchitz, I. A. *Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming*. (2008). ISBN 978-90-365-2656-2, 155 s.
- [10] Zang, S.-lai, Sun, L., Niu, C. (2013). Measurements of Bauschinger effect and transient behavior of a quenched and partitioned advanced high strength steel. *Materials Science and Engineering: A*, 586, 31-37. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.08.003>
- [11] Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranuntchai, S., Jirathearanat, S. (2013). Springback prediction in sheet metal forming of high strength steels. *Materials & Design*, 50, 253-266. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.02.060>
- [12] Židek, M. *Metalurgická tvařitelnost oceli za tepla a za studena*. (1995). ISBN 80-85341-45-X, 356 s.
- [13] Petruželka, J., Sonnek, P. (2007). *Tvařitelnost kovových materiálů*. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 211 s.
- [14] ČSN EN ISO 6892-1. (2021). *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [15] ČSN ISO 10275. (2021). *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení exponentu deformačního zpevnění*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [16] ČSN ISO 10113. (2020). *Kovové materiály – Plechy a pásy – Stanovení součinitele plastické anizotropie*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [17] Banabic, D. (2010). *Sheet Metal Forming Processes*. Springer Berlin Heidelberg. ISBN 978-3-540-88112-4, 301 s.
- [18] Cooreman, S., Lecompte, D., Sol, H., Vantomme, J., Debruyne, D. (2008). Identification of Mechanical Material Behavior Through Inverse Modeling and DIC. *Experimental Mechanics*, 48(4), 421-433. <https://doi.org/10.1007/s11340-007-9094-0>
- [19] Mulder, J., Vegter, H., Aretz, H., Keller, S., van den Boogaard, A. H. (2015). Accurate determination of flow curves using the bulge test with optical measuring systems. *Journal Of Materials Processing Technology*, 226, 169-187. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.06.034>
- [20] Stoughton, T. B., Yoon, J. W. (2011). A new approach for failure criterion for sheet metals. *International Journal of Plasticity*, 27(3), 440-459. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2010.07.004>
- [21] ČSN EN 16808. (2015). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení závislosti dvojosé napětí-deformace zkouškou vyboulením s optickými měřicími systémy*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [22] ČSN EN 12004-2. (2021). *Kovové materiály - Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy - Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [23] ČSN EN ISO 20482. (2014). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [24] ČSN EN 16630. (2018). *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška rozšiřováním otvoru*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [25] Fukui, Y., Nakanishi, K. (1989). A Study on the Formability of Sheet Steel. *JSME international journal. Ser. I, Solid mechanics, strength of materials*. 32(1), 142-148. ISSN 0914-8809. https://doi.org/10.1299/jsmea1988.32.1_142

- [26] Yoshida K. Purpose and feature of Yoshida buckling test (YBT). *Journal of the Japan Society for Technology of Plasticity* 1983; 24:901.
- [27] Interní dokument ŠKODA AUTO a. s.
- [28] Broberg, B. K. (1999). *Cracks and Fracture*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-134130-5.X5000-4>
- [29] Kejzlar, P., Pilvousek, T., Tregler, M. (2016). Determination of DC06+ZE Sheet Crack Cause. *Defect And Diffusion Forum*, 368, 121-125. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/DDF.368.121>
- [30] Andersson, A. (2009). Evaluation and visualisation of surface defects on auto-body panels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 821-837. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.02.078>
- [31] Flores, P., Duchene, L., Bouffioux, C., Lelotte, T., Henrard, C., Pernin, N., Vanbael, A., He, S., Duflou, J., Habraken, A. (2007). Model identification and FE simulations: Effect of different yield loci and hardening laws in sheet forming. *International Journal of Plasticity*, 23(3), 420-449. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2006.05.006>
- [32] Butuc, M. C., Teodosiu, C., Barlat, F., Gracio, J. J. (2011). Analysis of sheet metal formability through isotropic and kinematic hardening models. *European Journal of Mechanics - A/Solids*, 30(4), 532-546. <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2011.03.005>
- [33] Vegter, H., ten Horn, C., Abspoel, M. (2009). The corus-vegter lite material model: simplifying advanced material modelling. *International Journal of Material Forming*, 2(S1), 511-514. <https://doi.org/10.1007/s12289-009-0640-4>
- [34] Carsley, J. E., Xia, C., Yang, L., Stoughton, T. B., Xu, S., Hartfield-Wünsch, S. E., Li, J. (2013). Benchmark 2 - Springback of a draw / re-draw panel: Part C. *AIP Conference Proceedings* 1567, 189–226. <https://doi.org/10.1063/1.4849982>
- [35] Allen, M., Oliveira, M., Hazra, S., Adetoro, O., Das, A., Cardoso, R. (2016). Benchmark 2 – Springback of a Jaguar Land Rover Aluminium. *Journal Of Physics: Conference Series*, 734. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/2/022002>
- [36] Banabic, D. (2016). Advances in Plastic Anisotropy and Forming Limits in Sheet Metal Forming. *Journal Of Manufacturing Science and Engineering*, 138(9). <https://doi.org/10.1115/1.4033879>
- [37] Lemoine, X. (2007). Behavior Laws and Their Influences on Numerical Prediction. In *AIP Conference Proceedings* (s. 269-274). AIP. <https://doi.org/10.1063/1.2729523>
- [38] Yoshida, F., Uemori, T. (2002). A model of large-strain cyclic plasticity describing the Bauschinger effect and workhardening stagnation. *International Journal of Plasticity*, 18(5-6), 661-686. [https://doi.org/10.1016/S0749-6419\(01\)00050-X](https://doi.org/10.1016/S0749-6419(01)00050-X)
- [39] Swift, H.W. (1952). Plastic instability under plane stress. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1(1), 1-18. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(52\)90002-1](https://doi.org/10.1016/0022-5096(52)90002-1)
- [40] Hockett, J.E., Sherby, O.D. (1975). Large strain deformation of polycrystalline metals at low homologous temperatures. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 23(2), 87-98. [https://doi.org/10.1016/0022-5096\(75\)90018-6](https://doi.org/10.1016/0022-5096(75)90018-6)
- [41] Banabic, D., Aretz, H., Comşa, D.S., Paraianu, L. (2005). An improved analytical description of orthotropy in metallic sheets. *International Journal of Plasticity*, 21(3), 493-512. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2004.04.003>
- [42] Nakazima, K., Kikuma, T., Hasuka, K. (1968). Study on the Formability of Steel Sheets. *Yamata Technical Report*, 264, 8517-8530.
- [43] Marciniak, Z., Kuczyński, K. (1967). Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal. *International Journal of Mechanical Sciences*, 9(9), 609-620. [https://doi.org/10.1016/0020-7403\(67\)90066-5](https://doi.org/10.1016/0020-7403(67)90066-5)
- [44] Abspoel, M., Scholting, M.E., Droog, J.M.M. (2013). A new method for predicting Forming Limit Curves from mechanical properties. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5), 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.022>
- [45] Brožovský, J., Materna, A. (2012). *Základy matematické teorie pružnosti*. VŠB Ostrava, 123 s.
- [46] Simunovic, S., Nukala, P. K. V. V., Fekete, J., Meuleman, D., Milititsky, M. (2003). Modeling of Strain Rate Effects in Automotive Impact. *SAE Transactions*, 112, 733–743. <https://doi.org/10.4271/2003-01-1383>
- [47] Shaw, J., Watanabe, K. (2001). Steel Strength and Processing Effects on Impact Deformation for a Crash Energy Management Component. *SAE Transactions*, 110, 490–496. <https://doi.org/10.4271/2001-01-1053>
- [48] Wang, W., Li, M., He, C., Wei, X., Wang, D., Du, H. (2013). Experimental study on high strain rate behavior of high strength 600–1000MPa dual phase steels and 1200MPa fully martensitic steels. *Materials & Design*, 47, 510-521. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.12.068>
- [49] Jocham, D., Norz, R., Volk, W. (2017). Strain rate sensitivity of DC06 for high strains under biaxial stress in hydraulic bulge test and under uniaxial stress in tensile test. *International Journal of Material Forming*, 10(3), 453-461. <https://doi.org/10.1007/s12289-016-1293-8>
- [50] Németh, M., Mihaliková, M. (2013). The Effect of Strain Rate on the Mechanical Properties of Automotive Steel Sheets. *Acta Polytechnica*, 53(4), 384-387. <https://doi.org/10.14311/1839>
- [51] Canadinc, D., Niendorf, T., Maier, H. J. (2010). On the coupled temperature–strain rate sensitivity of ultrafine-grained interstitial-free steel. *Scripta Materialia*, 63(5), 544-547. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2010.05.026>

- [52] Larour, P., Bäumer, A., Dahmen, K., Bleck, W. (2013). Influence of Strain Rate, Temperature, Plastic Strain, and Microstructure on the Strain Rate Sensitivity of Automotive Sheet Steels. *Steel Research International*, 84(5), 426-442. <https://doi.org/10.1002/srin.201200099>
- [53] Kim, J. H., Kim, D., Han, H. N., Barlat, F., Lee, M. G. (2013). Strain rate dependent tensile behavior of advanced high strength steels: Experiment and constitutive modeling. *Materials Science and Engineering: A*, 559, 222-231. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2012.08.087>
- [54] Keeler, S. P., Brazier, W. G. (1975). Relationship between Laboratory Material Characterization and Press-Shop Formability. *Microalloying*, 75, 517-530.
- [55] Raghavan, K. S., Van Kuren, R. C., & Darlington, H. (1992). Recent Progress in the Development of Forming Limit Curves for Automotive Sheet Steels. *SAE International, Paper No. 920437*. <https://doi.org/10.4271/920437>
- [56] Cayssials, F. (1998). A new method for predicting FLC. *Proceedings of the 20th IDDRG Congress*, 443-454.
- [57] Abspoel, M., Scholting, M. E., & Droog, J. M. M. (2013). A new method for predicting Forming Limit Curves from mechanical properties. *Journal Of Materials Processing Technology*, 213(5), 759-769. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.11.022>
- [58] Barata da Rocha, A., Jalinier, J. M. (1984). Plastic instability of sheet metals under simple and complex strain paths. *Transactions Of the Iron and Steel Institute Of Japan*, 24(2), 132-140. <https://doi.org/10.2355/isijinternational1966.24.132>
- [59] Volk, W., Hoffmann, H., Suh, J., Kim, J. (2012). Failure prediction for nonlinear strain paths in sheet metal forming. *Cirp Annals*, 61(1), 259-262. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.111>
- [60] Hora, P., Tong, L., Berisha, B. (2013). Modified maximum force criterion, a model for the theoretical prediction of forming limit curves. *International Journal Of Material Forming*, 6(2), 267-279. <https://doi.org/10.1007/s12289-011-1084-1>
- [61] Manopulo, N., Hora, P., Peters, P., Gorji, M., Barlat, F. (2015). An extended Modified Maximum Force Criterion for the prediction of localized necking under non-proportional loading. *International Journal of Plasticity*, 75, 189-203. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.02.00>
- [62] Stoughton, T. B., Yoon, J. W. (2012). Path independent forming limits in strain and stress spaces. *International Journal of Solids and Structures*, 49(25), 3616-3625. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2012.08.004>
- [63] Werber, A., Liewald, M., Nester, W., Grünbaum, M., Wiegand, K., Simon, J., Timm, J., Hotz, W. (2014). Development of a new failure prediction criterion in sheet metal forming. *International Journal of Material Forming*, 7(4), 395-403. <https://doi.org/10.1007/s12289-013-1134-y>
- [64] Mohr, D., Marcadet, S. J. (2015). Micromechanically-motivated phenomenological Hosford–Coulomb model for predicting ductile fracture initiation at low stress triaxialities. *International Journal of Solids and Structures*, 67-68, 40-55. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2015.02.024>
- [65] Roth, C. C., Mohr, D. (2016). Ductile fracture experiments with locally proportional loading histories. *International Journal of Plasticity*, 79, 328-354. <https://doi.org/10.1016/j.ijplas.2015.08.004>
- [66] Isik, K., Silva, M. B., Tekkaya, A. E., & Martins, P. A. F. (2014). Formability limits by fracture in sheet metal forming. *Journal Of Materials Processing Technology*, 214(8), 1557-1565. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.02.026>
- [67] Bhadeshia, H.K.D.H., Honeycombe, R.W.K. (2017). *Steels: Microstructure and Properties*. Butterworth-Heinemann. ISBN 978-0-08-10027-4, 462 s.
- [68] ČSN EN 10325. (2007). Ocel - Stanovení přírůstku výrazné meze kluzu vyvolaného tepelným zpracováním (index Bake-Hardening). Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a zkušebnictví
- [69] Tasan, C. C., Diehl, M., Yan, D., Bechtold, M., Roters, F., Schemmann, L., Zheng, C., Peranio, N., Ponge, D., Koyama, M., Tsuzaki, K., Raabe, D. (2015). An Overview of Dual-Phase Steels: Advances in Microstructure-Oriented Processing and Micromechanically Guided Design. *Annual Review of Materials Research*, 45(1), 391-431. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070214-021103>
- [70] Pinard, P. T., Schwedt, A., Ramazani, A., Prah, U., Richter, S. (2013). Characterization of Dual-Phase Steel Microstructure by Combined Submicrometer EBSD and EPMA Carbon Measurements. *Microscopy And Microanalysis*, 19(4), 996-1006. <https://doi.org/10.1017/S1431927613001554>
- [71] Schemmann, L., Zaefferer, S., Raabe, D., Friedel, F., Mattissen, D. (2015). Alloying effects on microstructure formation of dual phase steels. *Acta Materialia*, 95, 386-398. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2015.05.005>
- [72] Lai, Q., Bouaziz, O., Gouné, M., Brassart, L., Verdier, M., Parry, G., Perlade, A., Bréchet, Y., Pardo, T. (2015). Damage and fracture of dual-phase steels: Influence of martensite volume fraction. *Materials Science and Engineering: A*, 646, 322-331. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2015.08.073>
- [73] Calcagnotto, M., Adachi, Y., Ponge, D., Raabe, D. (2011). Deformation and fracture mechanisms in fine- and ultrafine-grained ferrite/martensite dual-phase steels and the effect of aging. *Acta Materialia*, 59(2), 658-670. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2010.10.002>
- [74] VDA 239-100. (2016). Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung / Sheet Steel for Cold Forming, AGB (GTC)
- [75] AHSS Application Guidelines, Dostupné z: <https://ahssinsights.org/blog/a-new-global-formability-diagram/>

- [76] Fonstein, N. (2015). *Advanced High Strength Sheet Steels*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
- [77] Tisza, M. (2021). Three Generations of Advanced High Strength Steels in the Automotive Industry. In K. Jármai & K. Voith (Ed.), *Vehicle and Automotive Engineering 3* (s. 81-94). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-15-9529-5_7
- [78] Yi, H. L., Sun, L., & Xiong, X. C. (2018). Challenges in the formability of the next generation of automotive steel sheets. *Materials Science and Technology*, 34(9), 1112-1117. <https://doi.org/10.1080/02670836.2018.1424383>
- [79] Noder, J., Gutierrez, J. E., Zhumagulov, A., Dykeman, J., Ezzat, H., & Butcher, C. (2021). A Comparative Evaluation of Third-Generation Advanced High-Strength Steels for Automotive Forming and Crash Applications. *Materials*, 14(17). <https://doi.org/10.3390/ma14174970>
- [80] Gutierrez, J. E., Noder, J., Paker, N., Bowman, J., Zhumagulov, A., Dykeman, J., Malcolm, S., Ezzat, H., & Butcher, C. Formability Characterization of 3rd Generation Advanced High-Strength Steel and Application to Forming a B-Pillar. In (s. -). <https://doi.org/10.4271/2021-01-0267>
- [81] Kolařík, L., Forejtová, L., Suchánek, J. (2017). Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum*.
- [82] Frańcz, W., Stachowicz, F., Pieja, T. (2013). ASPECTS OF VERIFICATION AND OPTIMIZATION OF SHEET METAL NUMERICAL SIMULATIONS PROCESS USING THE PHOTOGRAMMETRIC SYSTEM. *Acta Metallurgica Slovaca*, 19(1), 51-59. <https://doi.org/10.12776/ams.v19i1.86>
- [83] Li, L. -G., Liang, J., Shi, B. -Q., Guo, C., & Hu, H. (2014). Grid-based photogrammetry system for large scale sheet metal strain measurement. *Optik*, 125(19), 5508-5514. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2014.06.069>
- [84] Shi, B. -Q., & Liang, J. (2012). Circular grid pattern based surface strain measurement system for sheet metal forming. *Optics And Lasers in Engineering*, 50(9), 1186-1195. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2012.04.007>
- [85] Pilvousek, T. (2017) Metodika zpřesňování výsledků numerických simulací hlubokého tažení využitím přístupu optické digitalizace a alternativních materiálových modelů. *Disertační práce*. ČVUT v Praze
- [86] GOM GmbH, *ARGUS v6.2 User Manual*. (2009).
- [87] Slota, J., Jurčišin, M., Gajdoš, I., Spišák, E. (2013). THE SENSITIVITY OF A PHOTOGRAMMETRIC METHOD IN FORMABILITY ANALYSIS. *Acta Mechanica Et Automatica*, 7(2), 117-123. <https://doi.org/10.2478/ama-2013-0021>
- [88] Slota, J., Jurčišin, M., Spišák, E. (2013). Experimental and Numerical Analysis of Local Mechanical Properties of Drawn Part. *Key Engineering Materials*, 586, 245-248. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.586.245>
- [89] Lemeš, S. (2010). Validation of numerical simulations by digital scanning of 3D sheet metal objects, 136. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.4389.0003>
- [90] Bathe, K. J. (2014). *Finite Element Procedures: Second Edition*. Watertown. ISBN 978-0-9790049-5-7, 1048 s.
- [91] Spišák, E. (2000). *Matematické modelovanie a simulácia technologických procesov - ťahanie*. Technická univerzita v Košiciach. ISBN 80-7099-530-0, 156 s.
- [92] Bambach, M. (2016). Fast simulation of incremental sheet metal forming by adaptive remeshing and subcycling. *International Journal of Material Forming*, 9(3), 353-360. <https://doi.org/10.1007/s12289-014-1204-9>
- [93] Kubli, W., Reissner, J. (1995). Optimization of sheet-metal forming processes using the special-purpose program AUTOFORM. *Journal Of Materials Processing Technology*, 50(1-4), 292-305. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01390-M](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01390-M)
- [94] Yoon, J. W., Stoughton, T. B., Rolfe, B., Beynon, J. H., Hodgson, P. (Ed.). (2014). *NUMISHEET 2014: The 9th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes: Part A Benchmark Problems and Results and Part B General Papers*. American Institute of Physics. ISBN 978-0-7354-1195-1, 1150 s.
- [95] Cardoso, R. P. R., Yoon, J. W., Dick, R. E., Souza Neto, E., Cesar de Sa, J. M. A., Adetoro, O. B. (Ed.). (2016). NUMISHEET 2016: 10th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes. *Journal Of Physics: Conference Series*, 734. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/734/1/011001>
- [96] Kaan, I., Levesque, J., Worswick, M., Butcher, C. (Ed.). (2022). *NUMISHEET 2022: The 12th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes*. Springer Nature. ISBN 978-0-7354-1195-1, 995 s.
- [97] Tatipala, S., Pilthammar, J., Sigvant, M., Wall, J., Johansson, C. M. (2018). Introductory study of sheet metal forming simulations to evaluate process robustness. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, 418. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/418/1/012111>
- [98] Rolfe, B. F. (2004). FE Robustness: comparing sheet metal forming variation and finite element models. In AIP Conference Proceedings (s. 958-963). AIP. <https://doi.org/10.1063/1.1766651>
- [99] Lee, I. (2020) AutoForm Accuracy Footprint Part I: The concept of accuracy footprint and application cases. *AutoForm Webinar*. AutoForm Engineering GmbH

- [100] Li, H., Sun, G., Li, G., Gong, Z., Liu, D., Li, Q. (2011). On twist springback in advanced high-strength steels. *Materials & Design*, 32(6), 3272-3279. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.02.035>
- [101] Ul Hassan, H., Traphöner, H., Güner, A., Tekkaya, A. E. (2016). Accurate springback prediction in deep drawing using pre-strain based multiple cyclic stress-strain curves in finite element simulation. *International Journal of Mechanical Sciences*, 110, 229-241. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.03.014>
- [102] Xue, X., Liao, J., Vincze, G., Pereira, A. B., Barlat, F. (2016). Experimental assessment of nonlinear elastic behaviour of dual-phase steels and application to springback prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 117, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2016.08.003>
- [103] Banu, M., Takamura, M., Hama, T., Naidim, O., Teodosiu, C., Makinouchi, A. (2006). Simulation of springback and wrinkling in stamping of a dual phase steel rail-shaped part. *Journal Of Materials Processing Technology*, 173(2), 178-184. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.023>
- [104] Xue, X., Liao, J., Vincze, G., Sousa, J., Barlat, F., Gracio, J. (2016). Modelling and sensitivity analysis of twist springback in deep drawing of dual-phase steel. *Materials & Design*, 90, 204-217. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.10.127>
- [105] Ingarao, G., Lorenzo, R. D., & Micari, F. (2009). Analysis of stamping performances of dual phase steels: A multi-objective approach to reduce springback and thinning failure. *Materials & Design*, 30(10), 4421-4433. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.04.001>
- [106] Ingarao, G., Di Lorenzo, R. (2010). A new progressive design methodology for complex sheet metal stamping operations: Coupling spatially differentiated restraining forces approach and multi-objective optimization. *Computers & Structures*, 88(9-10), 625-638. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2010.02.002>
- [107] Papeleux, L., Ponthot, J.F. (2002). Finite element simulation of springback in sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 125-126, 785-791. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00393-X](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00393-X)
- [108] Xu, W.L., Ma, C.H., Li, C.H., Feng, W.J. (2004). Sensitive factors in springback simulation for sheet metal forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 151(1-3), 217-222. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2004.04.044>
- [109] Wang, W., Zhao, Y., Wang, Z., Hua, M., Wei, X. (2016). A study on variable friction model in sheet metal forming with advanced high strength steels. *Tribology International*, 93, 17-28. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2015.09.011>
- [110] Kim, Y. S., Jain, M. K., Metzger, D. R. (2012). Determination of pressure-dependent friction coefficient from draw-bend test and its application to cup drawing. *International Journal Of Machine Tools And Manufacture*, 56, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.12.011>
- [111] Savkoor, A. R. (2001). Models of Friction. *Handbook of Materials Behavior Models* (s. 700-759). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-012443341-0/50075-2>
- [112] Hol, J., Cid Alfaro, M. V., Meinders, T., & Huétink, J. (2011). Advanced Friction Modeling in Sheet Metal Forming. *Key Engineering Materials*, 473, 715-722. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.473.715>
- [113] Durmaz, U., Heibel, S., Schweiker, T., Merklein, M., Berahmani, S., Hol, J., & Naegele, P. (2021). Enhancement of springback prediction of AHSS parts by advanced friction modelling. *Iop Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1157(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1157/1/012033>
- [114] Wang, W., Hua, M., Wei, X. (2012). A comparison study of sliding friction behavior between two high strength DP590 steel sheets against heat treated DC53 punch: Hot-dip galvanized sheet versus cold rolled bare sheet. *Tribology International*, 54, 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2012.05.005>
- [115] Sigvant, M., Pilthammar, J., Hol, J., Wiebenga, J. H., Chezan, T., Carleer, B., den Boogaard, T. van. (2019). Friction in sheet metal forming: influence of surface roughness and strain rate on sheet metal forming simulation results. *Procedia Manufacturing*, 29, 512-519. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2019.02.169>
- [116] Leocata, S., Senner, T., Reith, H., & Brosius, A. (2020). Experimental analysis and modeling of friction in sheet metal forming considering the influence of drawbeads. *The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology*, 106(9-10), 4011-4021. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04847-z>

Publikace autora vztahující se k disertační práci

- [1A] Valeš, M., Novák, V., Tatiček, F., Šanovec, J., Chrást'anský, L. (2019). Outer Car Body Panels Made of Dual-Phase Steel. *METAL 2019 Conference Proceedings*, 507-512. 1. ISBN 978-80-87294-92-5. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.824>
- [2A] Pačák, T., Tatiček, F., Valeš, M. (2019). COMPENSATION OF SPRINGBACK IN LARGE SHEET METAL FORMING. *Acta Polytechnica*, 59(5), 483-489. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0483>
- [3A] Valeš, M., Pačák, T., Tatiček, F. (2017). Problems in Manufacturing of Car Body Panels with Use of HSS. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*, Ing. Jan Kudláček, 166-171. ISBN 978-80-87583-22-7
- [4A] Pačák, T., Tatiček, F., Valeš, M. (2019). Accuracy improvement of the numerical simulation results in the process of sheet metal working. *Technological Forum 2019*, Ing. Jan Kudláček, 300-304. ISBN 978-80-87583-30-2
- [5A] Havelka, J., Tatiček, F., Hejnic, J., Novák, V., Valeš, M., Šanovec, J. (2021). DEVELOPMENT TRENDS IN THE FIELD OF DEFORMATION PATH STUDY UNDER THE CONDITIONS OF SHEET METAL FORMING. *Technological Forum 2021*, Ing. Jan Kudláček, 52-55. ISBN 978-80-87583-33-3
- [6A] Satošek, R., Valeš, M., Pepelnjak, T. (2019). Study of Influential Parameters of the Sphere Indentation Used for the Control Function of Material Properties in Forming Operations. *Strojníški Vestnik – Journal of Mechanical Engineering*, 65(10), 585-598. <https://doi.org/10.5545/sv-jme.2019.6312>
- [7A] Maryt, J., Valeš, M., Novák, V., Tatiček, F., Stejskal, O. (2023). Effect of Temperature on Material Behaviour in the Tensile test. *METAL 2023 Conference Proceedings*. ISBN 978-80-88365-12-9. <https://doi.org/10.37904/metal.2023.4695>
- [8A] Pačák, T., Kubelka, M., Valeš, M. (2017). The Methodology and its Determination of the Springback in Stamping Processes of Outer Car Body Parts. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017*, Ing. Jan Kudláček, 192-197. ISBN 978-80-87583-22-7
- [9A] Valeš, M., Havelka, J., Chrást'anský, L., Tatiček, F., & Novák, V. (2021). Production and Assembly of Car Body Fifth Door with Use of Dual-Phase Steel HCT500X. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, COMAT 2020, 1178(1)*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1178/1/012061>
- [10A] Havelka, J., Tatiček, F., Valeš, M., Novák, V. (2020). THE UTILIZATION OF COMPLEX NUMERICAL SIMULATIONS OF STAMPING AND HEMMING PROCESSES FOR THE SAKE OF VISUALIZING THE MANUFACTURING PROCESS OF THE CAR'S FIFTH DOOR ASSEMBLY. *Technological Forum 2020*, Ing. Jan Kudláček, 47-48. ISBN 978-80-87583-32-6
- [11A] Valeš, M. (2016). The Influence of Strain Rate on the Stability of the Stamping Process. *Technological forum 2016*, Ing. Jan Kudláček, 166-171. ISBN 978-80-87583-17-3
- [12A] Novák, V., Valeš, M., Tatiček, F., Šanovec, J. (2019). The Effect of Strain Rate on Position of Forming Limit Curve. *METAL 2019 Conference Proceedings*, 450-454. ISBN 978-80-87294-92-5. <https://doi.org/10.37904/metal.2019.825>
- [13A] Novák, V., Valeš, M., Tatiček, F., Chrást'anský, L. (2021). Analysis of forming capacity of HCT490X and DX57D depending on strain rate. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, COMAT 2020, 1178(1)*. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1178/1/012045>
- [14A] Valeš, M., Novák, V., Tatiček, F., Šanovec, J., Chrást'anský, L. (2019). Feasibility of DP500 Steel Outer Car Body Parts. *Technological Forum 2019*, Ing. Jan Kudláček, 170-176. ISBN 978-80-87583-30-2
- [15A] Valeš, M., Chrást'anský, L., Tatiček, F., Pačák, T. (2018). Comparison of Numerical Simulation and Deep Drawing Test of DP500 Steel. *METAL 2018 Conference Proceedings*, 501-506. ISBN 978-80-87294-84-0
- [16A] Valeš, M., Šanovec, J., Kubelka, M., Novák, V. (2018). Cup Test Evaluation of DP500 Steel. *Technological Forum 2018 Book of Proceeding*, Ing. Jan Kudláček, 212-216. ISBN 978-80-87583-26-5
- [17A] Valeš, M., Pačák, T., Tatiček, F. (2017). Feasibility Study of Manufacturing Outer Car Body Parts with Use of DP500. *METAL 2017 Conference Proceedings*, 561-566. ISBN 978-80-87294-79-6
- [18A] Valeš, M., Chaloupecký, P. (2018). Aplikace výšepevných materiálů na povrchové díly karoserie a jejich zpracování. *ČSVZP, Plošné tváření a spojování plechu v automobilovém průmyslu*, 15-25. ISBN 978-80-87583-27-2
- [19A] Valeš, M., Tatiček, F., Šanovec, J., Novák, V., Maryt, J., Stejskal, O. (2023). A Method for Applying Dual-Phase Steel CR290Y490T-DP in Production of Tailgate Outer Lower. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 332-336. ISBN 978-80-87583-40-1
- [20A] Pačák, T., Valeš, M., Tatiček, F. (2017). Methodology of the Springback Compensation in Sheet Metal Stamping Processes. *METAL 2017 Conference Proceedings*, 502-507. ISBN 978-80-87294-79-6

- [21A] Valeš, M., Šanovec, J., Tatiček, F., Novák, V., Pačák, T. (2023). The Methodology of Using High-Strength Steel to Produce Outer Car Body Parts. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 337-341. ISBN 978-80-87583-40-1
- [22A] Chrást'anský, L., Šanovec, J., Martawirya, Y. Y., Valeš, M. (2019). APPLICABILITY VERIFICATION OF AUTOFORM SOFTWARE FOR FEM SIMULATION OF MECHANICAL FIXATION OF HEMMED JOINTS. *Acta Polytechnica*, 59(6), 554-559. <https://doi.org/10.14311/AP.2019.59.0554>
- [23A] Chrást'anský, L., Valeš, M., Novák, V., Hejnic, J. (2021). USABILITY OF AUTOFORM ASSEMBLY SOFTWARE FOR GROOVED FIXATION OF THE HEMMED JOINTS. *Technological Forum 2021*, Ing. Jan Kudláček, 98-101. ISBN 978-80-87583-33-3
- [24A] Valeš, M., Šanovec, J., Tatiček, F., Novák, V., Havelka, J., Chrást'anský, L. (2021). A METHOD FOR APPLYING DUAL-PHASE STEEL HCT500X. *Technological Forum 2021*, Ing. Jan Kudláček, 301-305. ISBN 978-80-87583-33-3

Další publikační činnost autora

- [25A] Novák, V., Šanovec, J., Valeš, M., Kostrunek, L., Tatiček, F., Veselý, M., Stejskal, O. (2023). Methodology of work with the ARGUS optical system in the conditions of sheet metal forming. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 232-236. ISBN 978-80-87583-40-1
- [26A] Valeš, M., Čadek, J. Smart Engineering enabling Smart Factory. *ČSVZP conference 2023, Mladá Boleslav*.
- [27A] Kostrunek, L., Tatiček, F., Valeš, M., Novák, V., Kamenský, T., Stejskal, O. (2023). Formability analysis for material CR5. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 166-170. ISBN 978-80-87583-40-1
- [28A] Maryt, J., Valeš, M., Novák, V., Tatiček, F., Stejskal, O., Petr, J. (2023). Effect of different material grades on numerical simulation of stamping. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 197-203. ISBN 978-80-87583-40-1
- [29A] Tatiček, F., Novák, V., Valeš, M., Kostrunek, L., Kamenský, T., Maryt, J. (2023). Formability analysis of selected batches of material grade CR5. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2023*, Ing. Jan Kudláček, 323-327. ISBN 978-80-87583-40-1
- [30A] Maryt, J., Valeš, M., Novák, V., Hejnic, J., Havelka, J., Tatiček, F. (2022). Creation of material card for material quality DX56. *Technological Forum 2022*, Ing. Jan Kudláček, 124-130. ISBN 978-80-87583-36-4
- [31A] Dvořáček, J., Tatiček, F., Novák, V., Valeš, M., Havelka, J., Maryt, J. (2022). Design of a heating device for tensile test. *Technological Forum 2022*, Ing. Jan Kudláček, 20-26. ISBN 978-80-87583-36-4
- [32A] Větrovec, M., Tatiček, F., Valeš, M., Novák, V., Maryt, J., Stejskal, O. (2022). Comparison of tools made by 3D printing. *Technological Forum 2022*, Ing. Jan Kudláček, 269-277. ISBN 978-80-87583-36-4
- [33A] Novák, V., Tatiček, F., Valeš, M., Havelka, J., Hejnic, J., Stejskal, O. (2021). INFLUENCE OF PUNCH SPEED ON FORMING CAPACITY FOR MATERIALS 1.0995 AND 1.0853. *Technological Forum 2021*, Ing. Jan Kudláček, 206-210. ISBN 978-80-87583-33-3
- [34A] Chrást'anský, L., Valeš, M., Havelka, J. (2021). USABILITY OF AUTOFORM FORMING SOFTWARE FOR GROOVED FIXATION OF THE HEMMED JOINTS. *Technological Forum 2021*, Ing. Jan Kudláček, 102-107. ISBN 978-80-87583-33-3
- [35A] Tatiček, F., Novák, V., Valeš, M., Chrást'anský, L., Machka, B., Matyáš, M. (2020). RESEARCH AND DEVELOPMENT IN THE STEEL DOOR FRAMES. *Technological Forum 2020*, Ing. Jan Kudláček, 137-141. ISBN 978-80-87583-32-6
- [36A] Krejsa, P., Novák, V., Tatiček, F., Valeš, M., Chrást'anský, L. (2020). DETERMINATION OF FORMING LIMIT CURVES ACCORDING TO TENSILE TEST AND ARAMIS SYSTEM. *Technological Forum 2020*, Ing. Jan Kudláček, 82-89. ISBN 978-80-87583-32-6
- [37A] Machka, B., Novák, V., Valeš, M., Tatiček, F., Stejskal, O. (2019). Forging a draw rod for a steam locomotive No. 464 053. *Technological Forum 2019*, Ing. Jan Kudláček, 273-278. ISBN 978-80-87583-30-2
- [38A] Novák, V., Valeš, M., Tatiček, F., Šanovec, J., Chrást'anský, L. (2019). The Effect of Punch Speed on Position of Forming Limit Curve. *Technological Forum 2019*, Ing. Jan Kudláček, 105-108. ISBN 978-80-87583-30-2

- [39A] Valeš, M. (2019). Analysis of Manufacturing Outer Car Body Parts Made of HSS. *Uczelniana sesja studenckich kól naukowych*, Krakow 05.06.2019 [Vyzvaná přednáška]
- [40A] Tatiček, F., Valeš, M., Machka, B., Chrást'anský, L. (2018). Analýza současného stavu – dělení a spojování materiálu. [Research Report] Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie. Report no. U12133/2018/042.
- [41A] Pačák, T., Valeš, M. (2018). Metodika kompenzace odpružení u velkoplošných karosářských výlisků. *MM Průmyslové spektrum*, (1,2), 34-35. ISSN 1212-2572
- [42A] Kubelka, M., Tatiček, F., Pačák, T., Šanovec, J., Valeš, M. (2018). Zařízení pro destruktivní zkoušení základního materiálu pro proces hlubokého tažení při plošném tváření. Czechia. Utility Model CZ 32093.
- [43A] Chrást'anský, L., Šanovec, J., Martawirya, Y. Y., Valeš, M. (2018). The Law of Similarity and its Application for Numerical Simulation of Sharp Geometries in Stamping. *METAL 2018 Conference Proceedings*, 378-383. ISBN 978-80-87294-84-0
- [44A] Chrást'anský, L., Valeš, M., Tatiček, F., Šatná, K. (2018). Properties of 3D Printed Samples. *Technological Forum 2018 Book of Proceeding, Ing. Jan Kudláček*, 80-85. ISBN 978-80-87583-26-5
- [45A] Pačák, T., Kubelka, M., Valeš, M. (2018). Compensation of the Springback Behavior in Large Sheet Metal Stamping. *Technological Forum 2018 Book of Proceeding, Ing. Jan Kudláček*, 160-164. ISBN 978-80-87583-26-5
- [46A] Tatiček, F., Novák, V., Chrást'anský, L., Valeš, M., Čermák, J., Šanovec, J., Machka, B. (2018). Analysis of Trimming Tool. *Technological Forum 2018 Book of Proceeding, Ing. Jan Kudláček*, 202-205. ISBN 978-80-87583-26-5
- [47A] Valeš, M., Vlk, V., Tatiček, F., Chrást'anský, L. (2018). Properties of Steel Hybrid Sandwich Materials. *Technological Forum 2018 Book of Proceeding, Ing. Jan Kudláček*, 217-220. ISBN 978-80-87583-26-5
- [48A] Chrást'anský, L., Valeš, M. (2018). Metody spojování využívající principy plastické deformace. *MM Průmyslové spektrum*, (1,2), 46-47. ISSN 1212-2572
- [49A] Tatiček F., Valeš M., Chrást'anský, L. (2018). Tváření sendvičových materiálů. *ČSVZP, Plošné tváření a spojování plechu v automobilovém průmyslu*, 67-70. ISBN 978-80-87583-27-2
- [50A] Tatiček, F., Valeš, M., Zikmund, P., Drašnar, M. (2017). Vlastnosti dílů vyráběných aditivními technologiemi. *Kovárenství*, (60), 70-73. ISSN 1213-9289
- [51A] Šanovec, J., Pilvousek, T., Valeš, M., Procházka, T. (2017). Trends in Modern Manufacturing of Hot-Formed Flat Semi-Finished Products. *Book of Proceeding from Conference Technological Forum 2017, Ing. Jan Kudláček*, 123-126. ISBN 978-80-87583-22-7
- [52A] Tatiček, F., Machka, B., Valeš, M. Návrh technologie vyhrdlování. [Research Report] DIRAC Industries s.r.o., 2016. Report no. 12133/2016/004.
- [53A] Tatiček, F., Čermák, J., Šanovec, J., Valeš, M., Machka, B. Konstrukční řešení nástroje. (2016). [Research Report] DIRAC Industries s.r.o. Report no. 12133/2016/009.
- [54A] Tatiček, F., Valeš, M., Machka, B. Konstrukce nástroje a ověření vyrobiteľnosti TOP PLATE talířových trysek pro fluidní kotle spalující tuhé palivo. (2016). [Research Report] Komořany: United energy, a.s. Report no. 12133/2016/019.
- [55A] Tatiček, F., Valeš, M., Čermák, J., Machka, B. Ověření vyrobiteľnosti TOP PLATE talířových trysek pro fluidní kotle spalující tuhé palivo. (2016). [Research Report] Komořany: United energy, a.s. Report no. 12133/2016/003.

Seznam použitých obrázků


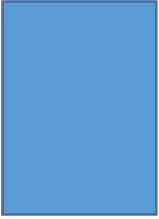
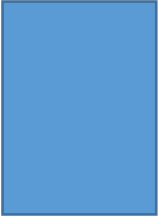

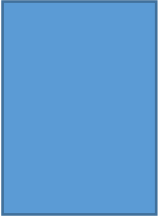

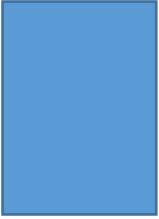

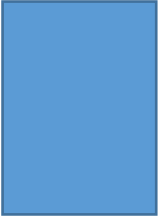

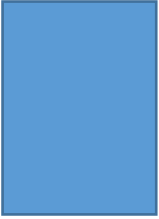
Obrázek 2-1, Model tažného nástroje, levá postranice automobilu	- 3 -
Obrázek 2-2, Vliv pevnostních vlastností oceli na podíl elastické deformace [1]	- 4 -
Obrázek 2-3, princip Bauschingerova efektu [10]	- 5 -
Obrázek 2-4, Faktory ovlivňující technologickou tvářitelnost [13]	- 6 -
Obrázek 2-5, Porušení výtažku	- 9 -
Obrázek 2-6, Lokální propad v oblasti prolisu pro kliku dveří	- 9 -
Obrázek 3-1, Schéma izotropního zpevnění materiálu. [45]	- 10 -
Obrázek 3-2, Schéma kinematického zpevnění materiálu. [45]	- 11 -
Obrázek 3-3, Schéma kombinovaného Yoshida – Uemori modelu. [45]	- 11 -
Obrázek 3-4, Vliv deformační dráhy na polohu křivky FLC [59]	- 13 -
Obrázek 3-5, Křivka porušení materiálu (Fracture locus) [66]	- 14 -
Obrázek 4-1, Stanovení přírůstku BH ₂ dle ČSN EN 10325:2007 [68]	- 16 -
Obrázek 4-2, GFD diagram s vyznačením předpokládané oblasti 3. generace AHSS ocelí [75]	- 19 -
Obrázek 5-1, příklad skenu lisovacího nástroje, průběh křivosti (vlevo), odchylky rozměrů (vpravo)	- 21 -
Obrázek 5-2, Princip měření, systém ARGUS [86]	- 22 -
Obrázek 5-3, Měření pomocí systému ARGUS, nanesení rastru na plech a měřicí artefakty	- 22 -
Obrázek 5-4, ukázka MKP sítě, adaptivní síťování	- 23 -
Obrázek 5-5, Rozptyl výsledků s ohledem na nejistoty na vstupu lisovacího procesu [99]	- 24 -
Obrázek 7-1, Výsledek num. simulace s ohledem na výpočetní strategii; s vyznačenými RPS body [8A]	- 29 -
Obrázek 7-2, Porovnání změřených hodnot a výsledků num. simulace s ohledem na výp. strategii [8A]	- 30 -
Obrázek 7-3, Porušení výlisku s rozdílným nastavením tření;	- 31 -
Obrázek 7-4, Sledované výlisky; SEAT ATECA HKau (CR4), ŠKODA SUPERB 3 blatník (CR220BH)	- 32 -
Obrázek 7-5, ARGUS – mračno bodů, SEAT ATECA HKau (vlevo), ŠKODA SUPERB 3 blatník (vpravo); červená barva: lisovací takt = 4 výlisky/min; modrá barva: lisovací takt = 12 výlisků/min [11A]	- 32 -
Obrázek 7-6, číselné označení RPS bodů (číslo v kruhovém poli)	- 33 -
Obrázek 7-7, Rozdílné výsledky rozměru s ohledem na odlišné pořadí uzavírání RPS bodů	- 33 -
Obrázek 8-1. Použité nástroje (vlevo a uprostřed), naskenovaný tažník (vpravo)	- 35 -
Obrázek 8-2., Logaritmické ztenčení kalíšku získané deformační analýzou ARGUS (DP500; R1,5)	- 36 -
Obrázek 8-3, Numerická simulace, ztenčení plechu v oblasti rádia	- 38 -
Obrázek 8-4, Velikost tažné vůle v nástroji	- 39 -
Obrázek 8-5. Výlisky DP500 a CR180BH	- 40 -
Obrázek 8-6. Značení metalografického výbrusu	- 40 -
Obrázek 8-7. Metalografické výbrusy	- 40 -
Obrázek 8-8, Zobrazení výbrusu vzorku č. 273 (DP500; R2) na mikroskopu OLYMPUS LEXT OLS 3000	- 40 -
Obrázek 8-9, Vizualizace průniku ploch výlisku a vnějších zadních dveří vozu ŠKODA Octavia III.	- 43 -
Obrázek 8-10, 3D model sestavy lisovacího nástroje; vlevo spodní část, vpravo horní část nástroje	- 43 -
Obrázek 8-11, Snímek lisovacího nástroje "Tornado"	- 44 -

Obrázek 8-12, Výtažek z oceli DP500	- 44 -
Obrázek 8-13, Výtažek z oceli DP500 s nanesenou deformační sítí	- 45 -
Obrázek 8-14, Výtažek z oceli DP500 s referenčními kameny a kalibračními měrkami systému ARGUS	- 45 -
Obrázek 8-15, Výlisek "Tornádo", nástroje v numerické simulaci	- 46 -
Obrázek 8-16, Sekvence snímků zachycující lisování čtyřhranné nádoby	- 46 -
Obrázek 8-17, Návrh sledovaných oblastí na výlisku (vlevo) a příprava pro zhotovení výbrusů (vpravo)	- 47 -
Obrázek 8-18, Zhotovené metalografické výbrusy pro vzorek A až E	- 47 -
Obrázek 8-19, Metalografické výbrusy, vzorek A; oblast Tornádo (vlevo), oblast "roh" (vpravo)	- 48 -
Obrázek 8-20, Průběh hodnot ztenčení na 6 sousedních elementech MKP sítě	- 48 -
Obrázek 8-21, Systém ARGUS, výsledek ztenčení	- 50 -
Obrázek 8-22, AutoForm R6, výsledek ztenčení	- 50 -
Obrázek 8-23, Materiálová karta „TU Liberec“	- 51 -
Obrázek 8-24, Materiálová karta „AutoForm“	- 52 -
Obrázek 8-25, Materiálová karta „Koncern VW“	- 52 -
Obrázek 8-26, FABIA III (vlevo), zadní dveře vnější (vpravo)	- 52 -
Obrázek 8-27, přehled nástrojů (v numerické simulaci) a operací pro výrobu dílu	- 53 -
Obrázek 8-28, "Formability" po OP20	- 54 -
Obrázek 8-29, Přehled umístění RPS bodů využívaných pro měření odpružení výlisku	- 54 -
Obrázek 8-30, Výsledky reálného měření a virtuální analýzy odpružení	- 55 -
Obrázek 8-31, RAPID SPACEBACK, 5. dveře vnější spodní	- 56 -
Obrázek 8-32, přehled nástrojů a operací pro výrobu dílu	- 56 -
Obrázek 8-33, Výsledek měření odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)	- 57 -
Obrázek 8-34, Výsledek virtuální analýzy odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)	- 57 -
Obrázek 8-35, Výsledek měření odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)	- 58 -
Obrázek 8-36, Výsledek virtuální analýzy odpružení pro materiál CR4 (nahore) a DP500 (dole)	- 58 -
Obrázek 8-37, ŠKODA OCTAVIA COMBI 4. generace s vyznačeným dílem HKau	- 60 -
Obrázek 8-38, HKau, pohled na finální vyráběný díl (TM6), měření v SW AutoForm R6	- 60 -
Obrázek 8-39, HKau, pohledy ISO E	- 61 -
Obrázek 8-40, Zjednodušený metodický plán	- 61 -
Obrázek 8-41, Geometrie nástrojů použitá ve finální numerické simulaci	- 62 -
Obrázek 8-42, Finální geometrie dílů, po odstranění problematických bodů z vyrobitelnosti	- 63 -
Obrázek 8-43, Bod 3, Porušení na rádiu: zvětšení poloměru a úprava průběhu ořezu	- 64 -
Obrázek 8-44, Bod 4, Porušení na rohu pod SBBR: zvětšení půdorysného rádia na R_{min} 2,5 mm	- 64 -
Obrázek 8-45, Bod 5, Porušení ve stojně pod SBBR: Zvětšit půdorysný rádius, zkrátit délku stojny	- 65 -
Obrázek 8-46, Bod 6, Riziko přetažené hrany při současném provedení	- 65 -
Obrázek 8-47, Bod 7, Střížný úhel je větší než 15°	- 65 -
Obrázek 8-48, Rozptyl výsledků odpružení, analýza robustnosti	- 66 -
Obrázek 8-49, Pořadí uzavírání RPS bodů	- 66 -
Obrázek 8-50, Výsledek odpružení, scan výlisku nahore, výsledek numerické simulace dole	- 67 -

<i>Obrázek 8-51, Hodnoty ztenčení po tahové operaci, numerická simulace</i>	- 68 -
<i>Obrázek 8-52, Hodnoty ztenčení po tahové operaci, ARGUS</i>	- 68 -
<i>Obrázek 8-53, Tuširovací otisk v tažné operaci OP20</i>	- 68 -
<i>Obrázek 8-54, Měření rozměrů po tahové operaci, polohění na polystyrenový blok</i>	- 69 -
<i>Obrázek 8-55, Výsledek odpružení po tahové operaci, numerická simulace</i>	- 70 -
<i>Obrázek 8-56, Výsledek odpružení po tahové operaci, scan ATOS III+ MV700</i>	- 70 -
<i>Obrázek 8-57, rozpad dílů pro sestavu vnějších pátých dveří</i>	- 71 -
<i>Obrázek 8-58, Rozpad dílů pro sestavu vnitřních pátých dveří</i>	- 71 -
<i>Obrázek 8-59, provedení lemového spoje s vnějším plechem z oceli CR4 (vlevo) a oceli DP500 (vpravo) se schematickým vyjádřením ztráty stability při ohybu</i>	- 72 -
<i>Obrázek 8-60, Numerická simulace sestavy, rozměrovost plné sestavy</i>	- 72 -
<i>Obrázek 8-61, Analýza numerické simulace sestavy se zaměřením na lemované oblasti s nejvyšším rizikem porušení a zvlnění</i>	- 73 -
<i>Obrázek 8-62, Analýza numerické simulace sestavy se zaměřením na lemované oblasti s nejvyšším rizikem porušení a zvlnění, hodnoty ztenčení</i>	- 73 -
<i>Obrázek 9-1, Metodika, nehmotná příprava výroby [21A]</i>	- 76 -
<i>Obrázek 9-2, Metodika, hmotná příprava výroby [21A]</i>	- 77 -

Seznam použitých tabulek

<i>Tabulka 3-1, Doporučená definice křivky zpevnění, podmínky plasticity a FLC s ohledem na aktuální stav poznání (horní řádek = vyšší přesnost).....</i>	<i>- 10 -</i>
<i>Tabulka 4-1. Mechanické vlastnosti vybraných hlubokotažných ocelí, dle VDA 239-100 [74].....</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabulka 4-2, Ekvivalent ocelí, dle VDA 239-100 / ČSN EN*</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabulka 4-3, Značení povlaku, dle VDA 239-100 / ČSN EN*</i>	<i>- 18 -</i>
<i>Tabulka 4-4, Příklad, procentuální zastoupení dílů karoserie s ohledem na kategorii ocelí [27, 81]</i>	<i>- 20 -</i>
<i>Tabulka 6-1, Redukce hmotnosti karoserie s použitím oceli DP500 pro vybrané díly</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Tabulka 6-2, Cena za kg materiálu (2021/Q1) [27]</i>	<i>- 27 -</i>
<i>Tabulka 7-1, Přehled parametrů pro jednotlivá nastavení výpočtu</i>	<i>- 29 -</i>
<i>Tabulka 8-1. přehled experimentu</i>	<i>- 34 -</i>
<i>Tabulka 8-2. Rozměry nástrojů použitých v experimentu.....</i>	<i>- 35 -</i>
<i>Tabulka 8-3. Vlastnosti měřicího systému</i>	<i>- 36 -</i>
<i>Tabulka 8-4. Procentuální ztečení v kritickém místě kalíšku (ARGUS).....</i>	<i>- 37 -</i>
<i>Tabulka 8-5, Numerická simulace, výsledek ztenčení pro DP500 a CR180BH</i>	<i>- 39 -</i>
<i>Tabulka 8-6, Metalografický výbrus pro měření tloušťky plechu, výsledek ztenčení pro DP500 a CR180BH -</i>	<i>41 -</i>
<i>Tabulka 8-7, Porovnání hodnot získaných z jednotlivých metod.....</i>	<i>- 42 -</i>
<i>Tabulka 8-8, Metalografický výbrus, hodnoty pro oblast "Tornádo"</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Tabulka 8-9, Metalografický výbrus, hodnoty pro oblast "roh"</i>	<i>- 49 -</i>
<i>Tabulka 8-10, Porovnání hodnot získaných z jednotlivých metod.....</i>	<i>- 50 -</i>
<i>Tabulka 8-11. přehled mechanických vlastností u použitých materiálových karet</i>	<i>- 51 -</i>
<i>Tabulka 8-12, Seznam problémových bodů ve vyrobitelnosti</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Tabulka 9-1, Přehled kontrolních bodů pro numerickou simulaci</i>	<i>- 78 -</i>

		Zpráva z auditu		A1	Kvalita lisovny MB
Audit výlisku / Mlada Boleslav		Pořádo			
Typ	<div style="border: 1px solid black; padding: 2px;">FABIA III – LZ dveře</div>			Auditat	
Checklist				Produktionsphase	
Datum				Status	
Identifikační číslo				Výrobní datum	
Auditor				Auditor	

Stálé atributy

Uvolnění výroby Uvolněno

zkouška mat. DP 500 - shodné se sérií

QK **1,7** Závady **6**

Cílové QK 1,1

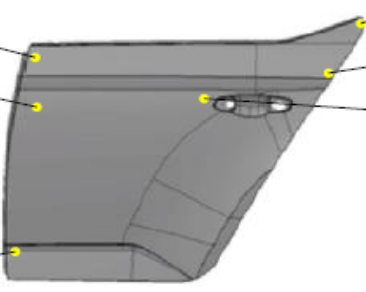
Zodpovědný	Cíl	Počet/Body	A1	A	B1	B	C1	C
Lisovna	Lisovna	fehlt 6/110					5/100	1/10
Summe		6/110	0/0	0/0	0/0	0/0	5/100	1/10

ID	Kód	MistoKontrolní bod	Druh závady	ZávodZóna	Body	ABC	Vinici
1	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C Lisovna
2	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C Lisovna
3	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C	2	10	C Lisovna
4	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C Lisovna
5	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C Lisovna
6	5851	L Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C Lisovna

1 - 5851/L/OOW

2 - 5851/L/OOW

3 - 5851/L/OOW



6 - 5851/L/OOW

5 - 5851/L/OOW

4 - 5851/L/OOW

tlac dna 24.07.2017 10:54:36 Strana 1 / 1

Auditové hodnocení výlisku, pravé dveře, DP500, 0,60 mm, zisk 110 b.



Zpráva z auditu

Audit výlisku / Mlada Boleslav

Typ: FABIA III – LZ dveře

Checklist: [redacted]

Datum: [redacted]

Identifikační číslo: [redacted]

Pořadov. číslo: [redacted]

Auditor: [redacted]

Produktionsphase: [redacted]

Status: [redacted]

Výrobní datum: [redacted]

Auditor: [redacted]

Stálé atributy

Uvolnění výroby: Uvolněno

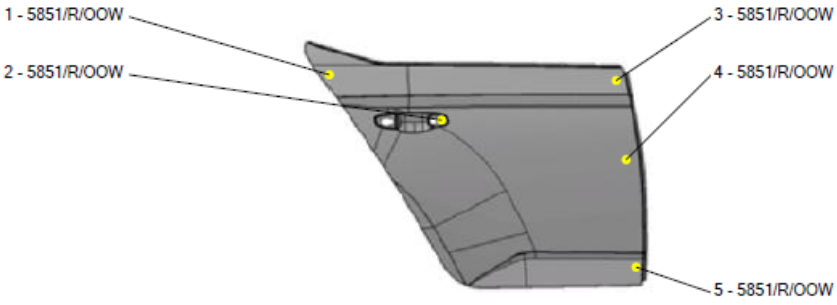
vikend

QK: 1,6 Závady: 5

Cilové QK: 1,1

Zodpovědný	Cil	Počet/Body	A1	A	B1	B	C1	C
Lisovna	Lisovna	fehlt 5/100					5/100	
		Summe	5/100	0/0	0/0	0/0	5/100	0/0

ID	Kód	Misto	Kontrolní bod	Druh závady	Závod	Zóna	Body	ABC	Vinici
1	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
2	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
3	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
4	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
5	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	2	20	C	Lisovna



Auditové hodnocení výlisku, levé dveře, CR180BH, 0,65 mm, zisk 100 b.



Zpráva z auditu

Audit výlisku / Mlada Boleslav

Typ: FABIA III – LZ dveře

Checklist: [redacted]

Datum: [redacted]

Identifikační číslo: [redacted]

Pořadové číslo: [redacted]

Auditor: [redacted]

Produktionsphase: [redacted]

Status: [redacted]

Výrobní datum: [redacted]

Auditor: [redacted]

Stálé atributy

Uvolnění výroby Uvolněno

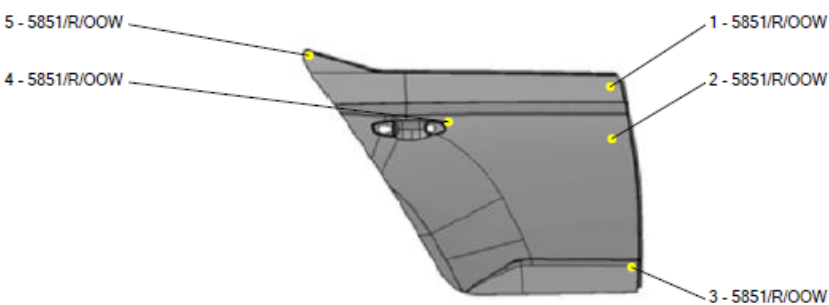
zkouška mat. DP 500 - shodné se sérií

QK 1,5 Závady 5

Cílové QK 1,1

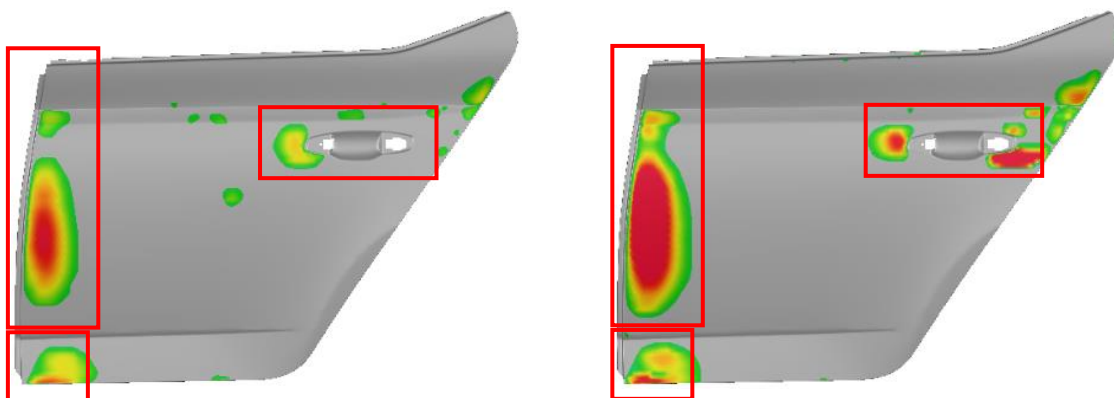
Zodpovědný	Cíl	Počet/Body	A1	A	B1	B	C1	C
Lisovna Lisovna	fehlt	5/90					4/80	1/10
Summe		5/90	0/0	0/0	0/0	0/0	4/80	1/10

ID	Kód	Místo	Kontrolní bod	Druh závady	Závod	Zóna	Body	ABC	Vinici
1	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
2	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
3	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C	2	10	C	Lisovna
4	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna
5	5851	R	Dveře zadní	OOW Zvlnění plechu	C1	1	20	C	Lisovna



Auditové hodnocení výlisku, levé dveře, DP500, 0,60 mm, zisk 90 b.

Průběh auditového hodnocení pro projekt Fabia III, pravá strana



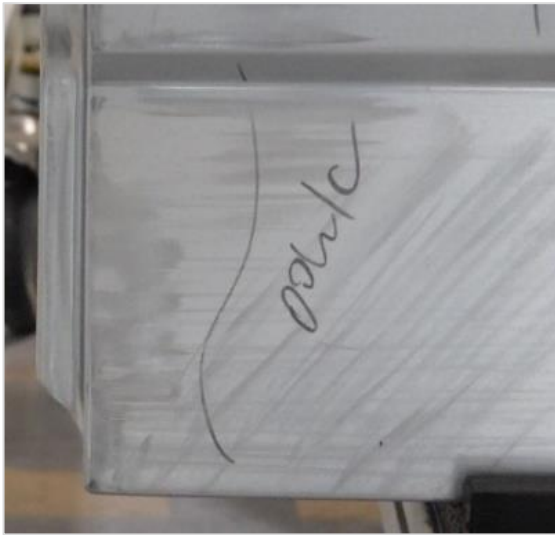
Výsledek virtuálního auditového hodnocení



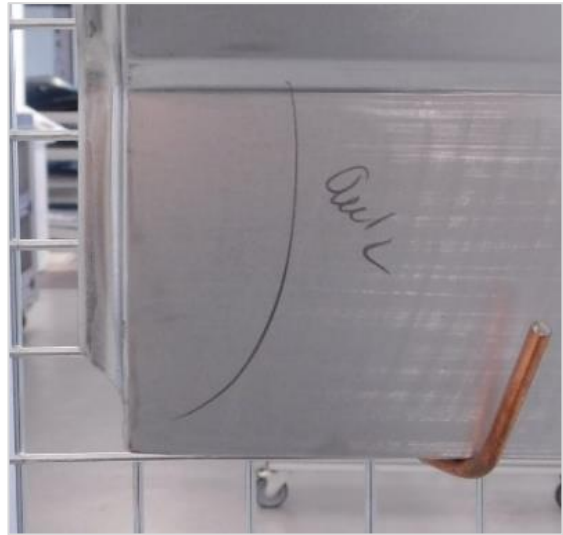
HX180BD, oblast crashové hrany



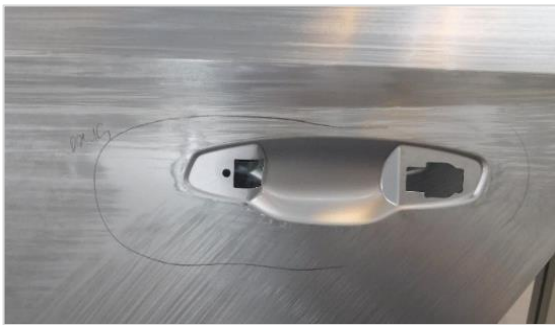
DP500, oblast crashové hrany



HX180BD, dolní oblast crashové hrany



DP500, dolní oblast crashové hrany



HX180BD, oblast kliky dveří



DP500, oblast kliky dveří

Příloha č. 2, Vyplněný kontrolní list numerické simulace pro díl HKau

Sloupec „Status“ vyjadřuje splnění předepsané kontrolního bodu:

OK = splněno; nOK = nesplněno. V případě „nOK“ výsledku je povinné vyplnit vysvětlující poznámku.

Bod	Kontrolní bod	Popis kontrolního bodu	Status	Poznámka
1	Výchozí nastavení, import dat			
1.01	Vytvoření nového simulačního souboru	Potvrdit vytvoření nového simulačního souboru	OK	
1.02	Nastavení platných standardů (velikost elementů, definované profily brzdících drážek apod.)	Potvrďte, že byl nastaveny aktuální platné standardy	OK	VW_2017, R8.0.1
1.03	Vyplnit a potvrdit data k projektu (dílu)	Potvrďte, že byly vyplněné základní informace o projektu. Vyplňte základní informace k numerické simulaci, např.: název projektu, označení dílu, zodpovědné osoby, požadovaný materiál a tloušťka na výrobu dílu, aj.	OK	
1.04	Potvrdit platnou geometrii dílu (datový stav), jeho symetrii a souřadný systém	Importujte platnou geometrii dílu. Geometrii importujte do sekce "Part". Geometrie dílu bude v rámci numerické simulace využívána jako reference pro vyhodnocení rozměrové přesnosti výlisku. Ověřte, zda je importována geometrie dílu v souladu s aktuálním a platným stavem dat a že je geometrie dílu importována v souřadném systému vozu.	OK	TM8, symetrie v rovině YZ (AXIS OP20)
1.05	Ověřit, že geometrie není použita ve více lisovacích operacích (vícečetně)	Potvrďte, že importovaná geometrie je použita vždy pouze v rámci jedné lisovací operace. Neměla by existovat jedna obecná geometrie pro definici ploch ve více lisovacích operacích.	OK	
1.06	Kontrola kvality ploch importované geometrie	Zkontrolujte kvalitu ploch importované geometrie. Na geometrii se nesmí nacházet nesrovnalosti v ploše (ostré hrany, mezery mezi segmenty apod.). Proveďte vizuální ověření kvality výpočetní FEM sítě na importované geometrii. Síť by neměla být degenerovaná, nebo např. obsahovat mezery nebo shluky elementů.	OK	Bez defektů
1.07	Kontrola velikosti poloměrů na geometrii	Ujistěte se, že je splněn minimální velikost pro rádius (musí být brán ohled na offset geometrie o tloušťku plechu). Pro vysvětlení např. R1 na vstupní geometrii a tloušťka plechu 0,8 mm = R0,2 na offsetované geometrii. V případě, že výsledný rádius offsetované geometrie je <R0, dojde ke kolizi geometrie.	OK	
1.08	Kontrola korektní definice těžiště nástroje, "Center of Die"	Potvrďte, že je správně definován střed lisovacích nástrojů pomocí funkce "Center of Die" (tedy souřadný systém AXIS OP20).	OK	
2	Materiálová karta			
2.01	Výběr správné materiálové karty	Potvrďte, že je použita materiálová karta, která odpovídá požadavkům na výrobu výlisku (typ materiálu, správně zvolená kategorie dle tloušťky plechu a správně zvolená povrchová úprava zinkem). V případě použití nestandardní materiálové karty, doplňte informaci o materiálové kartě do komentáře.	OK	DP500_Liberec__0-55-mm.mtb

2.02	Nastavení tloušťky materiálu	Potvrďte, že je správně definována tloušťka materiálu, která odpovídá požadavkům na výrobu vylisku.	OK	0,55 mm
3	Nastavení metodického plánu			
3.01	Potvrdit nastavení typu tažné operace, "Double / Single Action Draw"	Potvrďte, že je zvolen odpovídající typ tažné operace, kde "Single Action Draw" = Jednočinné tažení a "Double Action Draw" = Dvojčinné tažení.	OK	Single Action
3.02	Potvrdit počet a typ lisovacích operací a ověřit jejich značení (číslování)	Potvrďte, že je správně definován počet a typ lisovacích operací potřebných pro výrobu dílu. Lisovací operace v numerické simulaci by měly být shodné s lisovacím plánem. Nedoporučuje se zjednodušování numerické simulace. Ověřte, že jsou správně značeny jednotlivé lisovací operace (číselné označení).	OK	D-20, T-30, T-40, F-50, M-60
3.03	Kontrola střížných úhlů	Zkontrolujte, zda střížné úhly nepřekračují stanovený limit.	OK	Trim do 15°, Shear nad 10°
3.04	Potvrdit aktivaci mezioperačního odpružení	Potvrďte, že je po všech lisovacích operacích definována operace s aktivovanou funkcí "Free Springback". Výjimkou je poslední lisovací operace, po které následuje operace měření s funkcí "Real Measurement".	OK	
3.05	Kontrola souřadného systému pro jednotlivé operace	Zkontrolujte, zda je korektně definován AXIS jednotlivých lisovacích operacích v sekci "Plan" a "Directions" (naklopení nástrojů). Lze vyplnit manuálně pomocí ručně zadaných úhlů, naklopením od tažné operace nebo pomocí importovaného souřadného systému (axis OP).	OK	
4	Nástřih (blank)			
4.01	Zkontrolovat konturu nástřihu	Proveďte kontrolu tvaru kontury nástřihu. Jedná se o aktuální a platnou geometrii kontury?	OK	dle protokolu
4.02	Ověřit správné nastavení směru válcování, "Blank Roll Angle"	Ověřte, že je správně nastavený úhel pro směr válcování plechu vzhledem k průchodu lisovací linkou. Jedná se o parametr "Roll Angle".	OK	0° vůči posuvu výtažku
4.03	Potvrdit symetrii pro definici nástřihu	V případě, že je použita pomocná symetrie pro definici geometrie nástřihu, tak ověřte její funkčnost a zda je aplikovaná správně. Pokud symetrie není využita, potvrďte.	OK	Bez symetrie
5	Definice procesu			
5.01	Ověřit nastavení referenční plochy nástrojů (horní / spodní)	Ověřte, zda je správně definována referenční plocha nástrojů (horní/dolní)	OK	Horní strana
5.02	Ověřit nastavení zdvihu lisu, "Press Stroke"	Ověřte, jestli je správně definován zdvih lisu v sekci "Motion", konkrétně parametr "Press Stroke". Nesprávně definovaná hodnota zdvihu může způsobit komplikace kinematiky nástrojů, zejména při definici kinematiky přidržovače.	OK	
5.03	Ověřit nastavení třecích podmínek, "Lube"	Ověřte, zda jsou třecí podmínky procesu nastaveny korektně (s ohledem na platné standardy). Nastavení se může lišit podle aktuálních požadavků výroby.	OK	VW PressDep StahlEG (tlakově závislý koeficient tření pro ocel z galvanicky naneseným zinkem)
5.04	Ověřit případné nastavení tlakové závislosti, "Pressure Dependency"	Ověřte, že v případě použití 3D geometrických listů a Coulombova koeficientu tření je aktivován parametr "Pressure Dependency".	OK	VW PressDep StahlEG (tlakově závislý koeficient tření pro ocel z galvanicky naneseným zinkem)

5.05	Potvrdit nastavení předehtnutí nástřihu, "Pre-Bending" v OP20	Potvrďte, že bylo zvaženo použití funkce "Pre-Bending for Gravity" v OP Setup tažné operace OP20. Funkce "Pre-Bending" slouží k předehtnutí nástřihu plechu podle geometrie přídržovací plochy. Je nutné vybrat osu předehtnutí, a to osu X nebo Y.	OK	
5.06	Prověřit duplicitu nastavení mezioperačního odpružení	Potvrďte, že není duplicitně definováno mezioperační odpružení "Free Springback". Mezioperační odpružení je možné definovat v sekci "Plan / Production" (doporučeno) a v sekci OP Setup každé lisovací operace (doporučuje se zde nechat deaktivované).	OK	
5.07	Ověřit nastavení "Scaling of Tools"	Potvrďte, že bylo zvaženo použití funkce "Scaling of Tools" v programu AF. Případně, pokud importovaná geometrie již obsahuje scaling, který byl definován v jiném programu, tak zde zaškrtněte a doplňte informaci do komentáře.	OK	0,1560 %
5.08	Ověřit nastavení kinematiky přídržovacího systému	Potvrďte správnou hodnotu pro zdvih přídržovacího nástroje definovanou parametrem "Cushion Stroke" (zda odpovídá stávající konstrukci lisovacího nářadí).	OK	Zdvih přídržovače: 60 mm
5.09	Ověřit nastavení sil a tlaků přídržovacího systému	Ověřte správnost definice tlakového zatížení přídržovacích nástrojů. Pro přenos síly lze využít konstantní zatížení "Constant Force". Blíže skutečnosti je definice pro přenos tlaku skrze pružiny s funkcí "Spring-Controlled" nebo "Columns".	OK	1136 kN (60mm UT), 1300 kN (0mm UT)
5.1	Zkontrolovat výběr oblast bez otisku, "No-Bearing Area"	Ověřte, že je správně definována oblast pro spasování na přídržovací ploše nástrojů, tzv. "Bearing Area".	OK	Uvnitř
5.11	Ověřit zvolený model brzdících drážek, "Drawbead Model"	Potvrďte, že model brzdících drážek je definován buď jako adaptivní s funkcí "Unflattening", tzn. "Profile Based 3D Bead & Adaptive Line Bead". Pozor, model "Line Bead" by neměl být již používán.	OK	3D Bead
5.12	Kontrola použití "Flattening" / "Unflattening"	Potvrďte, že v případě aktivované funkce "Flattening" (zploštění drážky plechu po sevření nástrojů) u brzdících lišt je zároveň aktivována funkce "Unflattening" (zpětné vyražení drážky).	OK	3D Bead
5.13	Potvrdit použití středících kolíků, "Pilot Group"	Je správně definované ustavení nástřihu do nástroje pomocí kolíků, tzv. pilotů? Proveďte kontrolu polohy a rozměru kolíků (pilotů).	OK	D-20: 6x, T-30: 8x, T-40 + T-50: 2x na otvory
5.14	Potvrdit aktivaci stříhu včetně přidržení, "Cutting with Tools"	Potvrďte, že střížné operace jsou definovány vždy s využitím skutečného sevření do nástrojů, tedy jako "Cutting with Tools". Stříh bez sevření nástrojů, definovaný jako "Laser cut" není přípustný.	OK	Odlehčené nástroje
5.15	Potvrdit aktivaci zakládání plechu, "Locating/Gravity at Beginning of OP"	Potvrďte, že je aktivována funkce "Locating/Gravity at Beginning of Operation".	OK	
5.16	Zkontrolovat kinematiku lisovacích nástrojů	Potvrďte, že byla ověřena kinematika nástrojů ve všech lisovacích operacích. Dbejte zvýšené pozornosti zejména u tvářecích a vyplňovacích klínů. Ověření proveďte pomocí funkce rychlého výpočtu "Kin Check" a následně analýzy "Backdraft" a "Tools Penetration".	OK	Bez kolize
6	Finální měřicí operace			
6.01	Potvrdit nastavení operace odpružení, "Real Measurement"	Potvrďte, že pro konečné vyhodnocení analýzy odpružení je zvolena výhradně funkce skutečného	OK	Dle upínacího konceptu: 3Fx, 101fx, 102fx, 2FX, 4FX, 103fx

		měření, tedy "Real Measurement" s definicí pilotů, upínek.		
6.02	Potvrdit nastavení středičů a upínek, "Pilots and Clamps"	Potvrďte, že v rámci analýzy odpružení jsou definovány piloty (Pilots) a upínky (Clamps) v poloze dle aktuálního stavu RPS.	OK	
6.03	Potvrdit definici pořadí zavírání upínek, "Clamps closing"	Potvrďte, že v rámci analýzy odpružení je respektováno správné pořadí uzavírání upínek (Clamps)	OK	
6.04	Zkontrolujte rozměr středičů, "Pilots"	Potvrďte, že průměr pilotu je definován s tolerancí 0,2 mm pro středění.	OK	
6.05	Potvrdit nastavení referenční geometrie	Potvrďte, že pro analýzu odpružení je definována referenční geometrie.	OK	Horní plocha
7	Nastavení výpočtu			
7.01	Ověřit nastavení parametrů výpočtu, "Control Parameters"	Před spuštěním výpočtu numerické simulace ověřte, zda nastavení v sekci "Control" - "Main" je v souladu s aktuálním standardem. V případě, že byla oproti standardu provedena nějaká změna, tak důvod změny popište do komentáře.	OK	FV
7.02	Před uvolněním dat provést výpočet s použitím "Final Validation"	Potvrďte, že numerická simulace byla minimálně v konečné fázi projektu počítána a ověřována s nastavením výpočtu na typ "FV...Final Validation". Metodika výpočtu s nastavením "CE...Concept Evaluation" a "CE+...Concept Evaluation+" se doporučuje používat pouze na začátku projektu.	OK	
7.03	Zkontrolujte nastavení sítě u "Tool and Sheet Mesh"	Ověřte nastavení v sekci "Main". Konkrétně, že parametr "Max Side Length" (geometrie nástroje) \leq "Initial Max Element Size" (plechu).	OK	Dle standardu VW
8	Kontrola výpisu simulace (log)			
8.01	Provéřte kinematiku nástrojů z pohledu penetrace, "Tool Penetration"	Potvrďte, že před samotným výpočtem numerické simulace byla provedena analýza kinematiky lisovacího procesu s využitím funkce "Kin Check". V rámci celého lisovacího procesu nesmí docházet k penetraci nástrojů (kolize dvou a více nástrojů).	OK	Bez kolize
8.02	Provéřte log numerické simulace, "Warnings / Errors"	Po výpočtu numerické simulace prověřte výsledky logu v sekci "Solver Warnings". Výstupní log by neměl obsahovat žádné varování a chyby.	OK	Bez chyby či varování
8.03	Zkontrolujte celkový počet iterací	V sekci "Solver Monitor" prověřte celkový počet iterací u spočítané simulace, např. pomocí grafu "Equilibrium Iterations". V případě, že dojde k překročení povolené hodnoty, zkontrolujte daný časový okamžik (může dojít k penetraci nástrojů nebo chybě ve výpočetní síti, a tudíž nárůstu počtu iterací).	OK	do 60
9	Analýza výsledků			
9.01	Vizuálně prověřte zakládání nástříhu v každé OP	Potvrďte, že bylo provedeno vizuální ověření polohování a zakládání plechu v jednotlivých lisovacích operacích. Dosedá plech na nástavek v pořádku? Nepřetlačuje se plech v některé oblasti na nástavek přidržovačem?	OK	
9.02	Vizuálně prověřte pohyb nástříhu během zavírání nástrojů	Potvrďte, že bylo provedeno ověření, že při zavírání lisovacích nástrojů nedochází k nevhodnému pohybu plechu / výlisku.	OK	

9.03	Prověřit nechtěné deformace při zavírání nástrojů	Potvrďte, že nedochází k nechtěné deformaci plechu / výlisku. Pro ověření využijte analýzu "Unwanted sheet Deformations" během zavírání nástrojů. Analýza je k nalezení v sekci "User Defined".	OK	
10	Porušení materiálu			
10.01	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Formability"	Potvrďte, že byla provedena analýza výsledků numerické simulace z pohledu tváritelnosti pomocí funkce "Formability". Výsledky tváritelnosti by měly být v rámci grafu mezních deformací FLD pod křivkou mezního přetvoření FLC.	OK	
10.02	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Thinning"	Potvrďte, že byla provedena analýza výsledků numerické simulace z pohledu kritického ztenčení materiálu pomocí funkce "Thinning". Ztenčení materiálu musí být v oblasti výlisku v platném rozmezí hodnot. V případě použití nízkouhlíkového materiálu CR5 lze jít s hodnotami ztenčení až do 30%.	OK	
10.03	Vyhodnotit vznik trhlin s použitím "Max Failure"	Potvrďte, že byla provedena analýza výsledků numerické simulace vzhledem k vyčerpání plasticity materiálu pomocí funkce "Max Failure". Hodnoty analýzy nesmí přesáhnout kritérium 0,8. Po překročení tohoto kritéria hrozí vznik trhliny.	OK	
11	Zvlnění			
11.01	Vizuálně vyhodnotit vznik zvlnění	Potvrďte, že byla provedena analýza výsledků numerické simulace z pohledu zvlnění materiálu. Analýzu proveďte pomocí vizuálního ověření. Vizuálně hledejte potenciální oblasti viditelného zvlnění.	nOK	Riziko zvlnění při sevření nástříhu v D-20
11.02	Vyhodnotit vznik vln s použitím analýzy pro křivost sítě i stav napětí	Proveďte analýzu numerické simulace z pohledu zvlnění materiálu. Analýzu proveďte pomocí funkce "Potential Wrinkling". Pro vyhodnocení použijte škálu typu "Discrete" s hodnotami dle standardu, případně pro škálu typu "Continuous", upravte hodnoty dle lokálních hodnot parametru. Proveďte analýzu numerické simulace z pohledu zvlnění materiálu. Analýzu proveďte pomocí funkce "Wrinkles". Pro vyhodnocení použijte škálu typu "Continuous" obdobně jako u předchozího.	OK	
12	Vtažení			
12.01	Prověřit vtažení plechu v OP20	Ověřte, že bylo provedeno vyhodnocení vtažení materiálu do lisovacího nástroje. K vyhodnocení použijte analýzu "Draw-in".	OK	
12.02	Potvrdit provedení optimalizace vtažení a nástříhu	Ověřte, že bylo provedeno vyhodnocení výsledků tažné operace z pohledu vtažení. Případně proveďte úpravy nástříhu plechu. Materiál by se neměl kriticky zatahovat do drážky a zároveň by neměl zbytečně přebývat. Potvrďte, že byl nástříh vzhledem k vtažením optimalizován.	OK	
13	Přetažená hrana			
13.01	Prověřit nastavení analýzy přetažených hran, "Skid Lines"	Ověřte a případně potvrďte, že je provedeno korektní nastavení analýzy přetažených hran "Skid Lines" v OP20.	OK	

13.02	Vyhodnotit přetažené hrany s využitím kontaktního tlaku a narovnávání plechu	Ověřte a potvrďte, že byla provedeno vyhodnocení přetažených hran na výlisku. K vyhodnocení použijte analýzu "Skid Lines" v sekci „Evaluation“. Tato analýza slouží k vyhodnocení rozsahu přetažení, resp. kam až se materiál přes hranu nastavku přetahuje. K vyhodnocení použijte i analýzu „Unbending Strain“. Tato analýza slouží k vyhodnocení markantnosti přetažené hrany, resp. jak moc bude přetažená hrana na plechu viditelná. K hodnocení použijte barevnou škálu definovanou importovaným standardem.	OK	
14	Odpružení			
14.01	Prověřit nastavení orientace reference, "Reference Orientation"	Ověřte správnost nastavení před vyhodnocením analýzy odpružení. Měla by být definována správná kombinace vzhledem k orientaci ploch při vyhodnocení odpružení vzhledem k referenční geometrii.	OK	
14.02	Vyhodnotit díl z pohledu odpružení	Potvrďte, že bylo provedeno vyhodnocení výsledků numerické simulace z pohledu odpružení materiálu. Pro vyhodnocení využijte analýzu "Distance from Ref in Normal Dir". Výsledky analýzy odpružení by měly být konzultovány s výrobou.	nOK	Míra odpružení přesahuje ± 0.80 mm (a ± 0.20 mm pro dosedací plochy). <i>Korekce nástroje bude provedena až po zkušební sadě výlisků</i>
15	Kvalita povrchu			
15.01	Vyhodnotit kvalitu povrchu s ohledem na propady, "Surface Lows"	Ověřte a potvrďte, že výsledky numerické simulace jsou v pořádku z pohledu auditových vad výlisku. K vyhodnocení použijte analýzu "Surface Lows", která slouží k vyhodnocení propadů materiálu (metoda virtuálního propadu po rozpruženém materiálu).	OK	
15.02	Vyhodnotit kvalitu povrchu metodou virtuálního pravítka, "Three-Point-Gauging"	Ověřte a potvrďte, že výsledky numerické simulace jsou v pořádku z pohledu auditových vad výlisku. K vyhodnocení použijte analýzu "Three-Point-Gauging", která slouží k vyhodnocení propadů materiálu (metoda přípravku o dvou ramenech a úchylkoměru uprostřed měřidla).	OK	
16	Hodnocení sil			
16.01	Prověřit automatické navýšování přídržovací síly	Ověřte, že v průběhu výpočtu numerické simulace nebyla programem AutoForm automaticky navýšena síla přidržení. V takovém případě se objeví v logu "Solver Warnings" varování "Forced Increased". V takovém případě je nutné předefinovat sílu přidržení u konkrétního nástroje. Více informací v přehledu Warnings / Errors.	OK	Bez navýšení síly, bez otevření nástroje
16.02	Prověřit výsledky silového zatížení, "Forces"	Ověřte a potvrďte, že výsledné tvářecí síly ve všech operacích jsou v souladu s dostupnými lisovacími stroji a lisovacími linkami (obzvláště pokud byla v průběhu numerické simulace programem AutoForm automaticky navýšena tvářecí síla).	OK	Velikost i poloha síly v toleranci/limitu lisu