

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**TEZE
DISERTAČNÍ
PRÁCE**

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ PRO VÝROBU VNĚJŠÍCH DÍLŮ KAROSERIE

Ing. Michal Valeš

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha

Prosinec, 2023

Název anglicky:

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

Disertační práce byla vypracována v prezenční formě doktorského studia na Ústav strojírenské technologie Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Michal Valeš

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

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

Ústav Strojírenské technologie, Fakulta strojní ČVUT v Praze
Technická 4, 166 07, Praha 6

Oponenti:

prof. Ing. Emil Evin, CSc. (TUKE)

prof. Ing. Stanislav Ruzs, CSc. (VŠB-TUO)

prof. Ing. Františka Pešlová, Ph.D. (ČVUT)

Teze byly rozeslány dne:

Obhajoba disertace se koná dne v hod.

v zasedací místnosti č. 17 (v přízemí) Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6

před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru Strojírenská technologie.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Jan Suchánek, CSc.

předseda oborové rady oboru Strojírenská technologie

Fakulta strojní ČVUT v Praze

Obsah

1	Současný stav problematiky	1
1.1	Budoucí vývoj AHSS ocelí.....	3
2	Cíle disertační práce	5
3	Úvod k experimentální části práce	6
4	Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace.....	8
5	Hodnocení vyrobitelnosti dílů z vysokopevnostní oceli.....	9
6	Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření	10
6.1	Kontrolní list numerické simulace.....	12
7	Diskuze dosažených výsledků	15
8	Závěr.....	18
8.1	Splnění cílů disertační práce	18
8.2	Přínos disertační práce	20
8.3	Návrh dalšího rozvoje.....	21
	Seznam použité literatury v tezích	22
	Publikace autora vztahující se k disertační práci	24
	Anotace.....	26
	Summary	26

1 Současný stav problematiky

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 výlisku automobilové karoserie.

V případě, kdy výlisky nespĺňují 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 ke 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 vzhled 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.

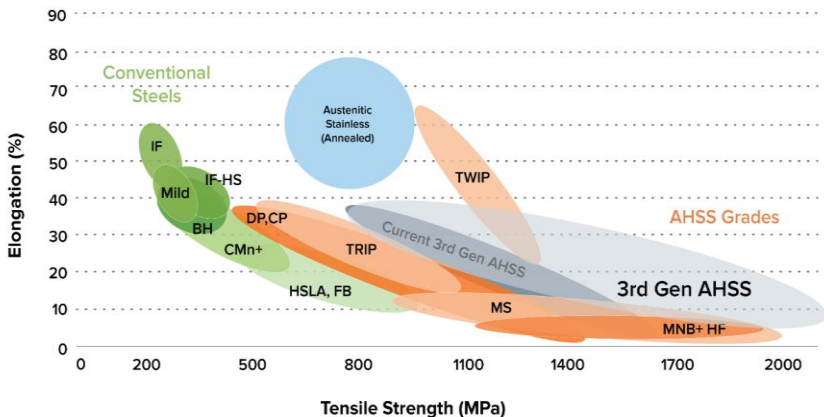
Ve vztahu k plošnému tváření kovů za studena poukazuje výše uvedený text na potřebu hledání takových řešení, která korespondují s trendem rostoucího využití virtuálního návrhu výrobních procesů a současně umožní nasazení vysokopevnostních ocelí pro lisování vnějších dílů automobilové karoserie.

Disertační práce se v rešerši současného stavu problematiky zabývá problematikou odpružení, tváritelnosti a mezních stavů (kapitola 2 disertační práce). V dalších kapitolách (kapitola 3 až kapitola 5 disertační práce) pak popisem deformačního chování ocelí, ocelmi využívanými pro výrobu pohledových dílů karoserie a technologiemi souvisejícími s podporou tvářecího procesu. Kapitola 1.1 stručně popisuje budoucí vývoj AHSS ocelí.

1.1 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. [1, 2]

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 1-1).



Obrázek 1-1, GFD diagram s vyznačením předpokládané oblasti 3. generace AHSS ocelí [3]

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. [2, 4]

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 [2, 5, 6, 7]. Literatura uvádí zlepšení tváritelnost především v oblasti homogenní deformace.

V tabulce 1-1 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 1-1, Příklad, procentuální zastoupení dílů karoserie s ohledem na kategorii ocelí [8, 9]

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 %

2 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

3 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 [10-16] 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 ocelmi. 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. designové 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 [17]), 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 disertační práce.

V tabulce 3-1 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 disertační práce.

Tabulka 3-1, 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	CR180BH	0,65	4,141	-1,148	-0,50*
TAH		DP500	0,60	3,823		
	Spaceback	CR180BH	0,65	3,347		
		DP500	0,60	3,091		

V rámci experimentální části práce byly využity materiálové jakosti uvedené v tabulce 4-1 disertační práce. 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.s.) a splňují mechanické vlastnosti předepsané příslušnou normou.

4 Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace

S ohledem na neustále se zvyšující význam numerické simulace v předvýrobní fázi výroby lisovacího náradí 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 disertační práce)
- Tribologie (kap.7.2 disertační práce)
- Rychlost deformace (kap. 7.3 disertační práce)
- Hodnocení odpružení (kap. 7.4 disertační práce)
- Definice nástrojů s ohledem na kontaktní oblasti [3A, 4A]
- Materiálová karta [1A, 5A, 6A, 7A]

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.

5 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 5-1.

Tabulka 5-1. přehled experimentu

	Výlisek	Materiál	Tloušťka
		[-]	[mm]
9.1	Rotačně symetrický výlisek (kapitola 8.1 disertační práce)	DP500	0,60
		CR180BH	0,65
9.2	Čtyřhranná nádoba s designovou hranou (kapitola 8.2 disertační práce)	DP500	0,55
9.3	FABIA III, Dveře vnější zadní (kapitola 8.3 disertační práce)	CR180BH	0,65
		DP500	0,60
9.4	RAPID SPACEBACK, páté dveře vnější spodní (kapitola 8.4 disertační práce)	CR4	0,70
		DP500	0,60
9.5	OCTAVIA IV, páté dveře vnější spodní (kapitola 8.5 disertační práce)	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.

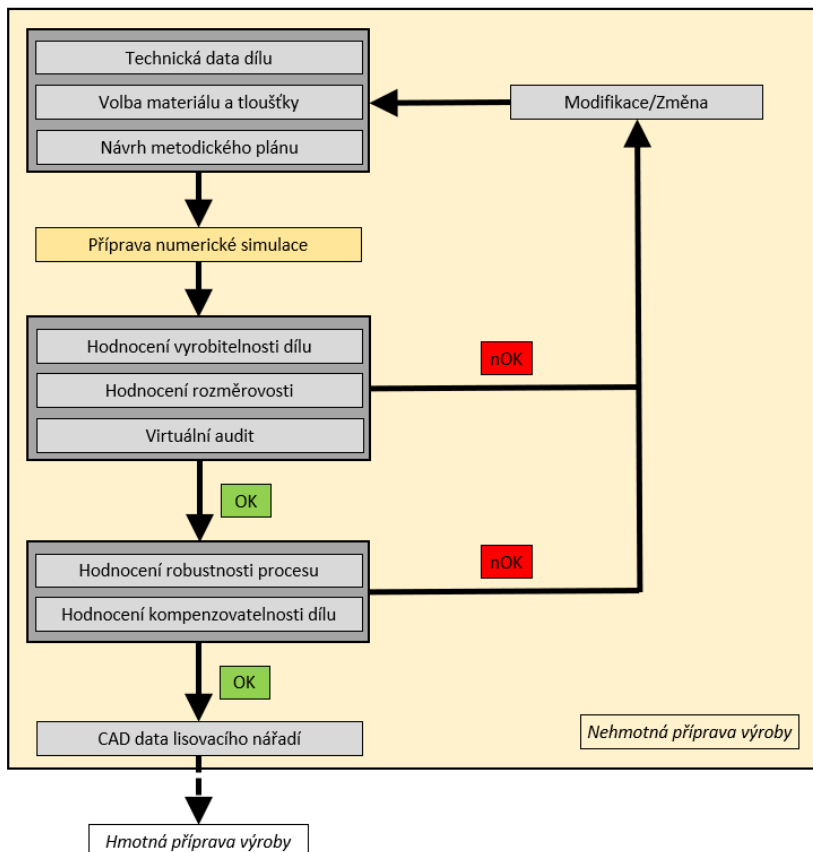
6 Návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření

Hlavním cílem disertační práce je navržení metodiky pro nasazení vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie. V předcházejících kapitolách disertační práce 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 užitné hodnoty dílů a současně i dosažení finančních úspor. Metodika je rozdělena na část nehmotné (obrázek 6-1) a hmotné přípravy výroby (obrázek 6-2).

Nehmotnou přípravu výroby lze charakterizovat především možnostmi 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 výrobitelnosti, 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 disertační práce). Uvolnění dat pro výrobu lisovacího nářadí by tedy mělo předcházet hodnocení robustnosti výroby dílu. Úzce souvisejícím tématem je i kompenzovatelnost odpružení (kap. 2.1 disertační práce). Klíčovým faktorem pro kompenzovatelnost není nominální hodnota odpružení ve vztahu k cílové geometrii, ale variace těchto hodnot právě ve vztahu ke vstupujícím nejistotám.

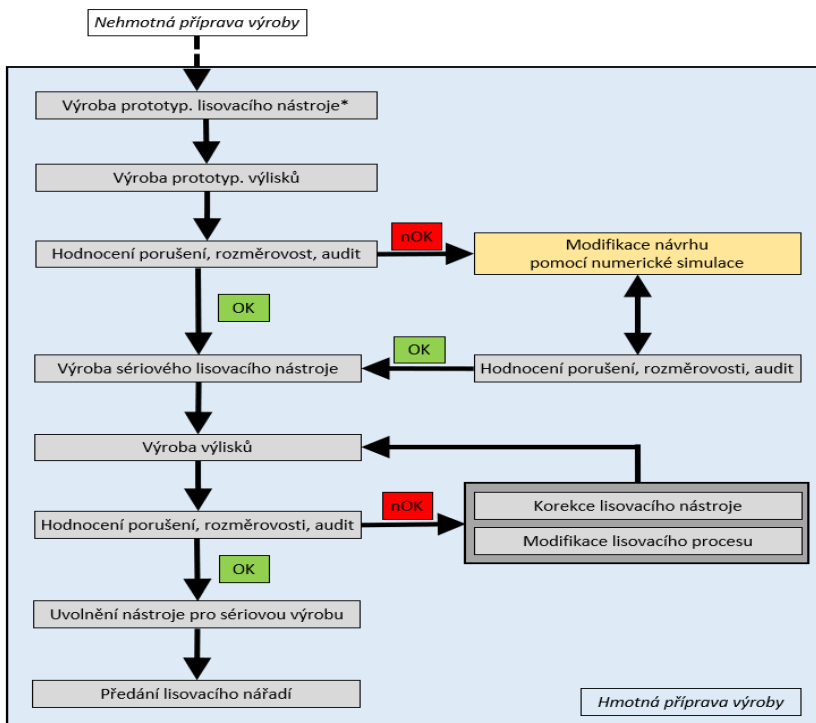
V případě nesplnění podmínek definovaných pro sledovaný díl (v levém sloupci na obrázku 6-1) je možné proces modifikovat. Virtuální modifikace procesu přináší významné finanční a časové úspory v porovnání s fyzickými korekcemi na lisovacím nářadí.



Obrázek 6-1, 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 rozměrnosti 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 6-2, Metodika, hmotná příprava výroby [21A]

6.1 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 disertační práce a kap. 8 disertační práce) 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 nářadí) 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 6-1 je uveden použitý přehled kontrolních bodů pro numerickou simulaci. Detailní přehled (s charakterizujícím komentářem pro jednotlivé body) pro vybraný díl s materiálovou jakostí je uveden v příloze č. 2 disertační práce. [21A, 24A]

Tabulka 6-1, 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	Provéřit duplicitu nastavení mezioperačního odpružení
5.07	Ověřit nastavení "Scaling of Tools"
5.08	Ověřit nastavení kinematiky přídržovacího systému
5.09	Ověřit nastavení sil a tlaků přídržovacího 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 přídržení, "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 nástřihu v každé OP
9.02	Vizuálně prověřit pohyb nástřihu 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 brzdící drážku)
12.02	Potvrdit provedení optimalizace vtažů a nástřihu
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)

7 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. 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 materiálových 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 disertační práce). 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 (příloha č.2 disertační práce) 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 disertační práce. 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. Vyplývající poznatky odpovídají předpokladu a korespondují se závěry publikovanými v literatuře [18, 19, 20, 21].

Numerické simulace využívající konstantní koeficient tření vykazují v případě geometrických brzdících drážek (3D plocha v CAD datech nástroje) nadhodnocené porušení (kap 7.2 disertační práce). 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 [22-25]

Rozdíly mezi výsledky numerické simulace mohou být způsobeny odlišným pořadím při sevření v měřících bodech [4A, 14A]. Změny rozměru se s ohledem na výše zmíněné mohou lišit až o 20 %. (kap 7.3 disertační práce) Numerická simulace by proto vždy měla respektovat pořadí uzavíraných bodů v reálném měřicím přípravku, tyto závěry jsou uváděny i v [10, 14, 21]

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 napěťovou 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 disertační práce 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 [26, 27]. Oblasti s malými rádií je možné hodnotit pomocí fotogrammetrických pouze v případě použití dostatečně 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 disertační práce.

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 střížná síla) a vyšší míra odpružení pro vysokopevnostní oceli. Identické skutečnosti jsou popsány v [5, 6, 11, 16]. 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 vytížena 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 disertační práce), jak uvádí i [10, 18, 19]

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 (disertační práce) 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).

8 Závěr

8.1 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, disertační práce). V případě použití vysokopevnostní oceli s horšími plastickými vlastnostmi, dochází k redukci okna vyrobitelnosti. 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 vyrobitelnosti vnějších dílů karoserie z vysokopevnostní oceli pomocí dílčích experimentů**

Hodnocení vyrobitelnosti výlisků z oceli DP500 a hlubokotažných ocelí je v práci logicky řazeno od nejnižší po nejvyšší tvarovou složitost (kap. 8.1 až 8.4, disertační práce). 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 vyrobitelnosti 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, disertační práce) 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 (disertační práce) 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 návrh 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. 6-1), 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 6.1. [21A, 24A]

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

8.2 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 (příloha č. 2 disertační práce) a současně i kontrolního listu numerické simulace (kapitola 6.1, teze). 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 disertační práce). Významnou částí je ověření navržené metodiky pomocí dílčích experimentů (kapitola 8 disertační práce). 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. 6.1, teze) 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 vzniklá 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.

8.3 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 v tezích

- [1] ASM HANDBOOK 14B, Metalworking: Sheet Forming. ASM INTERNATIONAL. ISBN-13: 978-0-87170-710-9, 841 s.
- [2] Fonstein, N. (2015). *Advanced High Strength Sheet Steels*. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-19165-2>
- [3] AHSS Application Guidelines, Dostupné z: <https://ahssinsights.org/blog/a-new-global-formability-diagram/>
- [4] 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
- [5] 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>
- [6] 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>
- [7] 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>
- [8] Interní dokument ŠKODA AUTO a. s.
- [9] Kolařík, L., Forejtová, L., Suchánek, J. (2017). Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie. *MM Průmyslové spektrum*.
- [10] Chongthairungruang, B., Uthaisangsuk, V., Suranunthai, 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>
- [11] 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>
- [12] 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>
- [13] 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>
- [14] 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>

- [15] 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>
- [16] 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>
- [17] VDA 239-100. (2016). Flacherzeugnisse aus Stahl zur Kaltumformung / Sheet Steel for Cold Forming, AGB (GTC)
- [18] 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>
- [19] Burchitz, I. A. *Improvement of Springback Prediction in Sheet Metal Forming*. (2008). ISBN 978-90-365-2656-2, 155 s.
- [20] 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)
- [21] 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>
- [22] 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>
- [23] 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>
- [24] 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>
- [25] 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>
- [26] Slota, J., Jurčičin, 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>
- [27] 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>

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. an 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. *Strojnicki 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., Chrástanský, 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., Chrástanský, 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] Chrástanský, 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] Chrástanský, 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., Chrástanský, L. (2021). A METHOD FOR APPLYING DUAL-PHASE STEEL HCT500X. *Technological Forum 2021, Ing. Jan Kudláček*, 301-305. ISBN 978-80-87583-33-3

Anotace

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.

Summary

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.

