

# APLIKACE VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ PRO VÝROBU VNĚJŠÍCH DÍLŮ KAROSERIE

**Autor: Ing. Michal VALEŠ**

**Školitel: doc. Ing. Jan ŠANOVEC, CSc., Školitel specialista: Ing. František TATÍČEK, Ph.D.**

## 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 užitných 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 výsledky. 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.

## ÚVOD DO PROBLEMATIKY

Oceli pro stavbu karoserie prochází výrazným 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 nutně 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 (úže související s numerickou simulací a hodnocením jejich výsledků) umožní použití nových materiálů pro výrobu panelových dílů karoserie, které je s ohledem na tvarovou složitost dílů komplikované.

## ÚVOD K EXPERIMENTÁLNÍ ČÁSTI PRÁCE

Dosažení redukce hmotnosti s využitím vysokopevnostních materiálů je možné dosáhnout jen zkoordinováním materiálových vlastností, geometrie dílu a možnosti 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 výrobitelný.

V tabulce 1 je uveden typový přehled dílů pro možnou redukci hmotnosti karoserie a úsporu nákladů. Uvedeny jsou pouze veřejně známé výrobní projekty (k roku 2020; úspora v EUR na vůz je založena na cenách uvedených v tabulce 6-2 disertační práce).

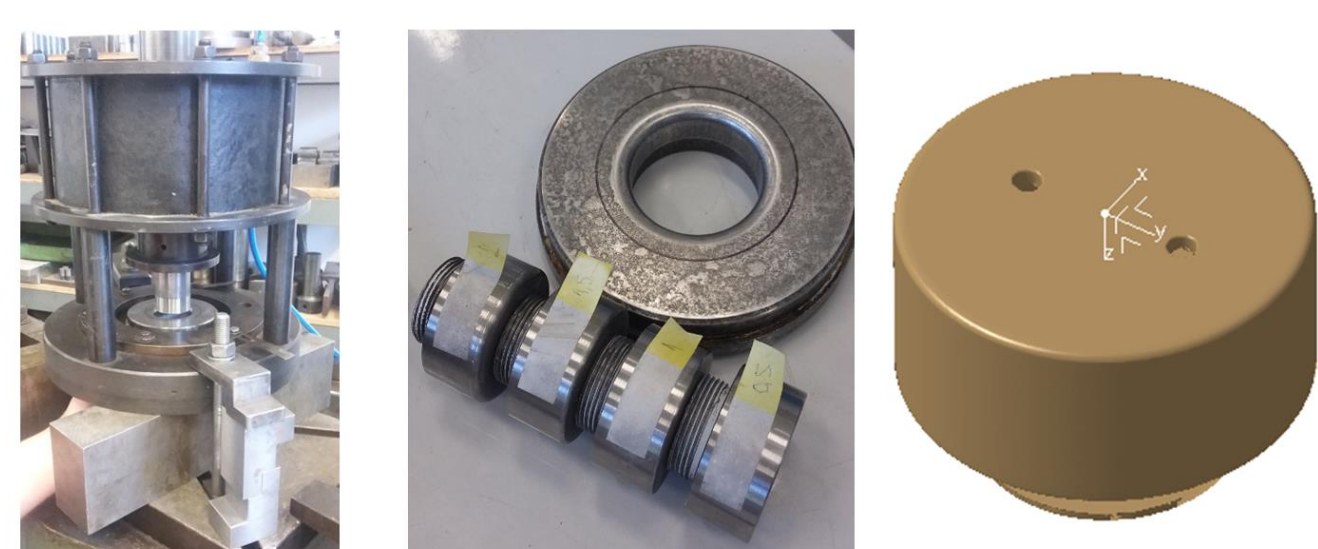
Tabulka 1, Potenciální úspora hmotnosti pro vybrané díly karoserie u vozů ŠKODA

| Díl  | Projekt              | Materiál | Tloušťka [mm] | Hmotnost dílu [kg] | $\Delta$ [kg/vůz] | $\Delta$ [EUR/vůz] |
|------|----------------------|----------|---------------|--------------------|-------------------|--------------------|
| HKau | Karoq                | DC05     | 0,70          | 2,19               | -0,31             | -0,10*             |
|      |                      | DP500    | 0,60          | 1,88               |                   |                    |
|      | Octavia IV. Generace | DC05     | 0,70          | 2,00               | -0,28             | -0,09*             |
|      |                      | DP500    | 0,60          | 1,72               |                   |                    |
| TAV  | Rapid                | CR180BH  | 0,65          | 4,14               | -1,16             | -0,50*             |
|      |                      | DP500    | 0,60          | 3,82               |                   |                    |
| TAH  | Spaceback            | CR180BH  | 0,65          | 3,35               | -1,16             | -0,50*             |
|      |                      | DP500    | 0,60          | 3,09               |                   |                    |

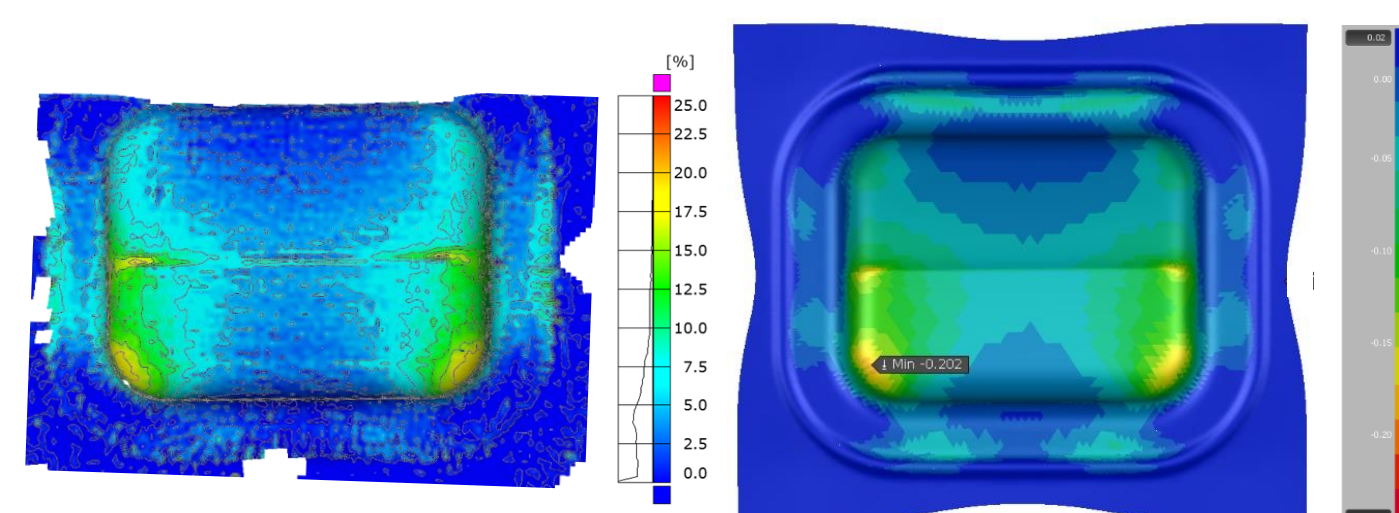
Dílčím cílem je hodnocení lisovatelnosti materiálu DP500 (CR290Y490T-DP dle VDA 239-100), ověření vybraných kroků navrhované metodiky a validace dostupných materiálových karet. Pro hodnocení byly vybrány výlisky uvedené v tabulce 2. Společně s materiálem DP500 byly sledovány i sériově používané materiály. 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), viz Tabulka 2 a Obr. 1 až Obr. 4.

Tabulka 2, Přehled výlisků využitých v experimentální části práce

| 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 (3. generace), 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 (4. generace), páté dveře vnější spodní | DP500   | 0,55          |



Obrázek 1, Rotačně symetrický výlisek (9.1): Nástroje, tažníky s rozdílným tažným poloměrem a sken nástroje



Obrázek 2, Čtyřhranná nádoba s designovou hranou (9.2): Porovnání ztenčení reálného výlisku (vlevo) a výsledku numerické simulace (vpravo)



Obrázek 3, FABIA (3. gen): Dveře vnější zadní (9.3), RAPID SPACEBACK: Páté dveře vnější spodní (9.4)



Obrázek 4, OCTAVIA COMBI (4. gen): Páté dveře vnější spodní (9.5)

## ZÁVĚR

Hlavním přínosem disertační práce je návrh metodiky pro použití vysokopevnostních ocelí pro výrobu vnějších dílů karoserie technologií lisování s užitím numerické simulace plošného tváření a současně i kontrolního listu numerické simulace. Předložená metodika se zaměřuje na nehmotnou fázi výroby lisovacího nástroje a úže 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. Významnou částí disertační práce je ověření navržené metodiky pomocí dílčích experimentů. 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.

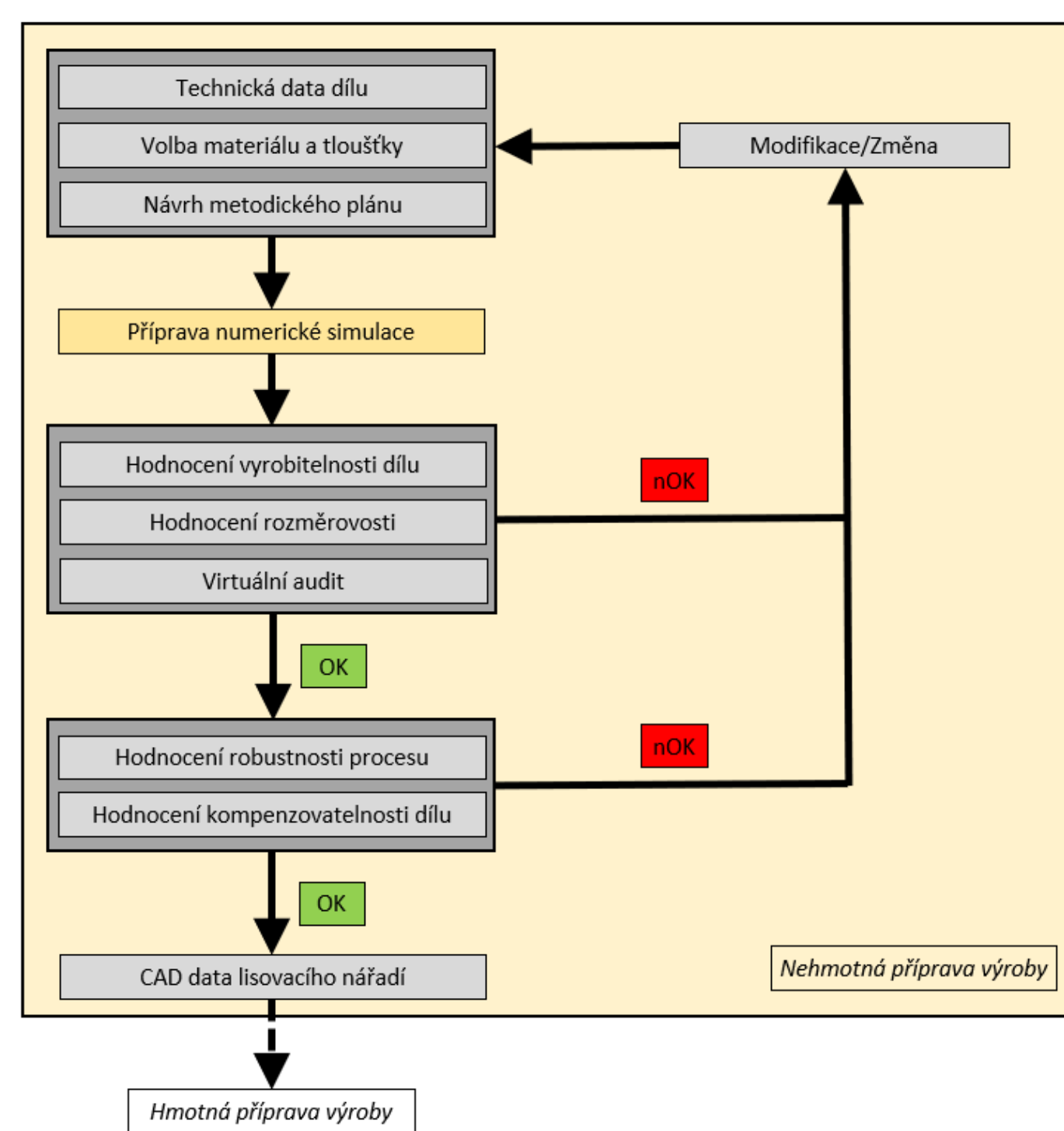
Účelem kontrolního listu numerické simulace je eliminace chyb a zjednodušení, kterých při návrhu lisovacího procesu uživatelé softwaru dopouštějí. Využití kontrolního listu pomáhá k vedení méně zkušených uživatelů simulačního SW a současně pomáhá eliminovat chyby spojené s nepozorností, nedbalostí či 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.

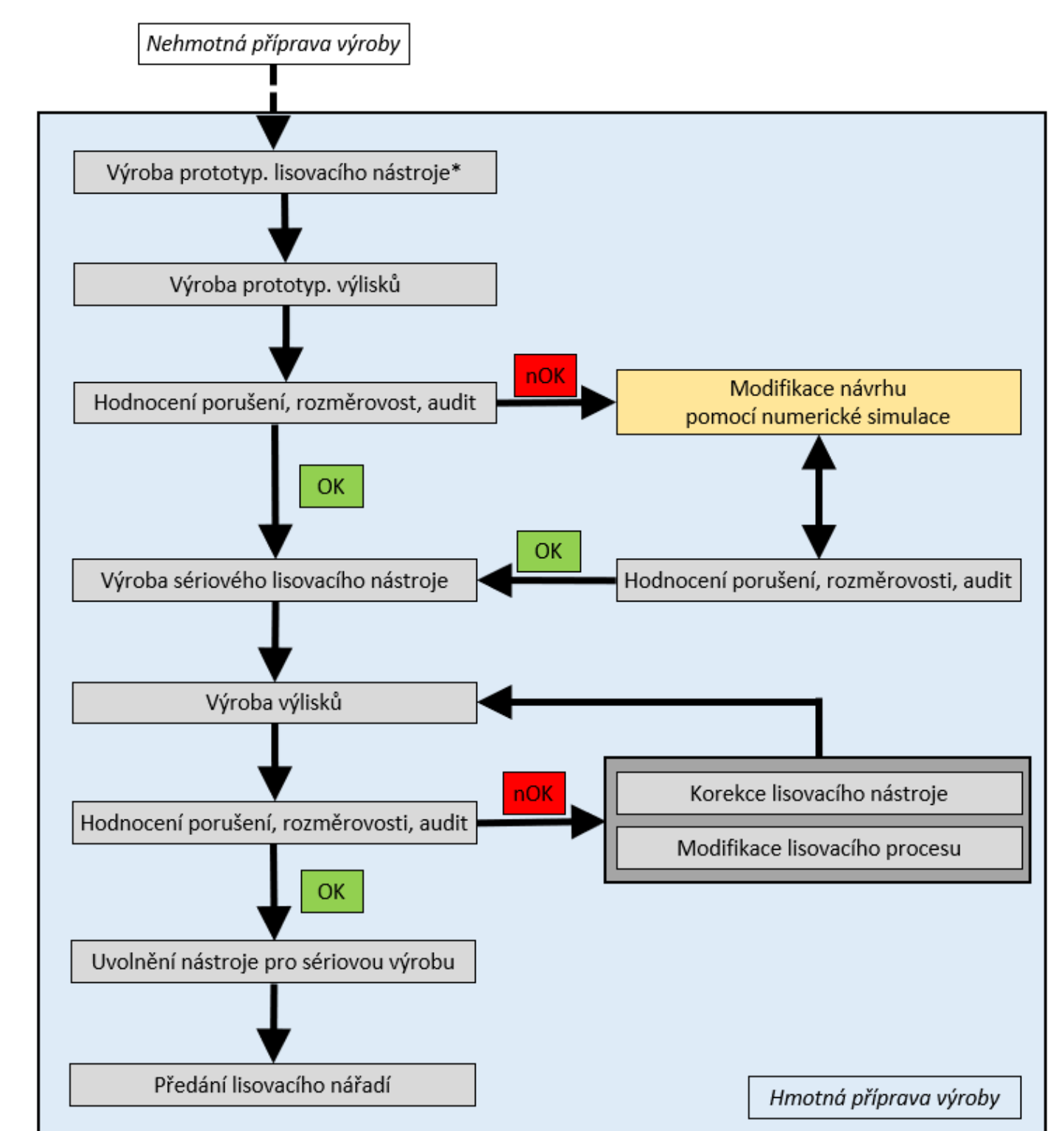
## NÁVRH METODIKY PRO POUŽITÍ VYSOKOPEVNOSTNÍCH OCELÍ PRO VÝROBU VNĚJŠÍCH DÍLŮ KAROSERIE TECHNOLOGIÍ LISOVÁNÍ S UŽITÍM NUMERICKÉ SIMULACE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ

Nehmotnou přípravu výroby lze charakterizovat především možností významné modifikace tvarových ploch a procesních parametrů s výrazně 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 plošného tváření. Přesnost numerické simulace je přitom významně ovlivněna nastavením okrajových podmínek.

V případě problematické výroby na sériovém nástroji pak numerická simulace (s použitím kontrolního listu v příloze disertační práce) může poskytnout rychlý virtuální návrh modifikací na lisovacím nástroji, aby došlo k odstranění závad na výlisku. 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.



Obrázek 5, Metodika, nehmotná příprava výroby



Obrázek 6, Metodika, hmotná příprava výroby

## SPLNĚNÍ CÍLŮ DISERTAČNÍ PRÁCE

### Analýza vlivu okrajových podmínek na přesnost výsledků numerické simulace

V rámci literární rešerše byly vtipovány 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 problematika materiálových karet. V případě použití vysokopevnostní oceli s horšími plastickými vlastnostmi, dochází k redukci okna výrobitelnosti. Jednotlivé oblasti byly hodnoceny na základě současného stavu poznání v literatuře a ověřeny pomocí dílčích experimentů pro vnější pohledové díly automobilové karoserie.

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.

### Hodnocení výrobitelnosti vnějších dílů karoserie z vysokopevnostní oceli pomocí dílčích experimentů

Hodnocení výrobitelnosti výlisků z oceli DP500 a hlubokotažných ocelí je v práci logicky řazeno od nejnižší po nejvyšší tvarovou složitost. 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.

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 výrobitelnosti 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 pro použití vysokopevnostní oceli (DP500) pro výrobu pohledového dílu karoserie (páté dveře vnější spodní) pro vůz ŠKODA OCTAVIA COMBI, 4. generace

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 doplněn o charakterizující komentář.

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. 5), 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 6. Neditelnou součástí předkládané metodiky je „Kontrolní list numerické simulace“.

Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn.