

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

DISERTAČNÍ PRÁCE

METODIKA MECHANICKÉ FIXACE LEMOVÝCH SPOJŮ PRO
ZAJIŠTĚNÍ ROZMĚROVÉ STABILITY BĚHEM VÝROBNÍCH
PROCESŮ

Ing. Lukáš Chrástanský

Školitel: *doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.*

Doktorský studijní program: Strojní inženýrství

Studijní obor: Strojírenská technologie

Praha

Srpen, 2021

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma „Metodika mechanické fixace lemových spojů pro zajištění rozměrové stability během výrobních procesů“ vypracoval pod vedením školitele samostatně a za použití v práci uvedených pramenů a literatury.

Datum:

.....

Podpis

Rád bych touto cestou vyjádřil poděkování doc. Ing. Janu Šanovcovi, CSc. za jeho cenné rady, připomínky a trpělivost při vedení mé disertační práce. Rovněž bych chtěl poděkovat celému oddělení konstrukce svařovacích přípravků a linek ve společnosti ŠKODA AUTO, a.s., za vstřícnost a pomoc při získání potřebných informací a podkladů.

.....
Podpis

Anotace

Název práce: Metodika mechanické fixace lemových spojů pro zajištění rozměrové stability během výrobních procesů

Autor: Ing. Lukáš Chrást'anský

Školitel: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

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

Klíčová slova: lemování, fixace lemových spojů, karoserie, panelové díly karoserie, automobilový průmysl, numerická simulace, Simufact, Deform, AutoForm

Abstrakt: Předkládaná disertační práce se zabývá problematikou fixace lemových spojů panelových dílů karoserie automobilu. Hlavním cílem disertační práce je návrh nového typu spoje, resp. nové metody fixace lemového spoje. Motivací hlavního cíle práce jsou požadavky, které jsou kladeny na panelové díly karoserie automobilu i jejich výrobu. Především se jedná o rozměrovou stabilitu, kvalitu povrchu pohledových dílů a ekonomičnost provozu. Navržená nová metoda mechanické fixace lemového spoje je ověřena pomocí numerických simulací a sérií experimentů jak na zkušebních vzorcích, tak i na reálném dílu přední kapoty vozidla. Součástí disertační práce je určení metodiky práce s produkčními simulačními softwary AutoForm Forming a AutoForm Assembly pro implementaci nové metody v inženýrské praxi.

Rozsah práce a příloh

Počet stran 135

Počet obrázků 122

Počet tabulek 6

Počet rovnic 12

Počet příloh 3

Annotation

Title: Methodology of mechanical fixation of hemmed joints to ensure dimensional stability during production processes

Autor: Ing. Lukáš Chrást'anský

Supervisor: doc. Ing. Jan Šanovec, CSc.

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

Keywords: hemming, fixation of hemmed joints, car body, car body panels, automotive, numerical simulation, Simufact, Deform, AutoForm

Abstract: The dissertation thesis deals with the issue of fixation of the hemmed joints of panel parts of the car body. The main goal of the dissertation is the design of a new type of joint, a respectively new method of fixation of the hemmed joint. The motivation of the main goal of the work is the requirements that are placed on the panel parts of the car body and their production. Above all, it is about dimensional stability, the surface quality of visible parts, and the economy of the production process. The proposed new method of mechanical fixation of the hemmed joint is verified by numerical simulations and a series of experiments both on test specimens and on a real part of the front hood of the vehicle. Part of the dissertation is to determine the methodology of work with production simulation software AutoForm Forming and AutoForm Assembly for the implementation of a new method in to engineering practice.

Volume of work

Number of pages	135
Number of pictures	122
Number of tables	6
Number of equations	12
Number of attachments	3

OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	9
1 ÚVOD	11
2 TECHNOLOGIE LEMOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU	12
2.1 Nejčastěji používané metody lemování	13
2.1.1 Konvenční lemování - „Tabletop hemming“	14
2.1.2 Rolnové lemování	16
3 POŽADAVKY NA LEMOVÉ SPOJE - KVALITA A HODNOCENÍ LEMOVÝCH SPOJŮ	18
3.1 Kvalita povrchu	18
3.2 Rozměrová kvalita	20
3.2.1 Mezera pro zástavbu panelových dílů	21
3.2.2 Plošné zarovnání panelů	22
3.3 Příklad auditové kontroly po lemování v reálném provozu	23
4 FIXACE LEMOVÝCH SPOJŮ PANELOVÝCH DÍLŮ KAROSERIE AUTOMOBILU	25
5 SOUČASNÝ STAV FIXACE LEMOVÝCH SPOJŮ PANELOVÝCH DÍLŮ KAROSERIE AUTOMOBILU	27
5.1 Metody využívající teplo/svařování/pájení	27
5.1.1 Odporové bodové svařování	27
5.1.2 MIG pájení	28
5.1.3 Lemování s výstupkovým svařováním	29
5.1.4 Technologie částečného vytrvzení lepidla - „želatinace“	31
5.1.5 Fixace lemových spojů elektromagnetickým pulzním svařováním	32
5.1.6 Rolnové lemování s kontinuálním vytvrzováním lepidla	33
5.1.7 Fixace kombinací rolnového lemování a ultrazvukového svařování	34
5.1.8 Fixace laserem	35
5.1.9 VarioPicker	37
5.2 Mechanické metody fixace lemových spojů	38
5.2.1 Technologie příčných a podélných výstupků	38
5.2.2 Fixace dutinovou vložkou	39
5.2.3 Metoda zámkových výstupků	40
5.3 Analýza konvenčních metod fixace lemových spojů	43
6 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE	45
7 NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE	46

7.1	Požadavky na nový způsob fixace lemového spoje.....	46
7.2	Drážková fixace lemového spoje.....	47
7.3	Návrh proveditelnosti	48
7.3.1	Materiál přední kapoty.....	50
7.3.2	Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek do vnitřního plechu.....	53
7.3.3	Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků do stojiny na vnějším plechu ..	54
7.3.4	Určení vhodného stroje pro zhotovení drážek a háčků.....	54
7.4	Ověření funkčnosti navržených nástrojů pro mechanickou fixaci lemových spojů.....	55
7.5	Pracoviště fixace lemových spojů	56
8	METODIKA NUMERICKÝCH SIMULACÍ DRÁŽKOVÉ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE.....	59
8.1	Úvod do numerických simulací.....	59
8.2	Metoda konečných prvků.....	60
8.2.1	Popis použití MKP v numerických simulacích.....	61
8.2.2	Možnosti ve výběru výpočtového elementu	63
8.3	Software pro numerickou simulaci.....	66
8.3.1	Přehled simulačních softwarů využívaných v experimentu disertační práce.....	67
8.4	Ověření drážkové fixace v softwaru Simufact.....	70
8.5	Ověření navržené metody pomocí softwaru Deform a navržení optimálních parametrů pro nastavení nástrojů drážkové fixace.....	74
8.5.1	Pevnost lemového spoje s drážkovou fixací.....	83
8.5.2	Kontrola kvality povrchu	87
8.6	Experiment simulace fixace s využitím SW AutoForm Forming	89
8.6.1	Zákon podobnosti a jeho aplikace	92
8.6.2	Návrh organizačního diagramu práce pro software AutoForm Forming	111
8.7	Experiment simulace fixace s využitím SW AutoForm Assembly.....	112
8.7.1	Návrh organizačního diagramu práce pro software AutoForm Assembly	115
9	OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY DRÁŽKOVÉ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE V PRAXI	116
10	DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR	119
10.1	Splnění cílů disertační práce	122
10.2	Přínos disertační práce	124
10.3	Návrh dalšího rozvoje metody	124
	SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ	125

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA DISERTAČNÍ PRÁCE	129
SEZNAM OBRÁZKŮ	132
SEZNAM TABULEK.....	135

Příloha 1 – Brožura systému ATOS 5

Příloha 2 – Brožura SW GOM Inspect

Příloha 3 - Základní rozměry nástrojů pro drážkovou fixaci lemových spojů

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Seznam použitých zkratek

BH efekt	Bake Hardening – vlastnost materiálu s dodatečným zpevněním při vypalování laku
BiW	Body in White – sestavená karoserie před lakováním
CAD	Computer-aided Design – počítačem podporované projektování
CE (CE+)	Concept Evaluation - metoda výpočtu v programu AutoForm Forming
FEM	Finite Element Method – metoda konečných prvků
FLC	Forming Limit Curve – křivka mezních deformací
FLD	Forming Limit Diagram – diagram mezních přetvoření
FV	Final Validation – metoda výpočtu v programu AutoForm Forming
KTL	Kataforézní lakování
MBO (MCO)	Označuje vylepšení povrchu a jeho olejovou úpravu
MKP	Metoda konečných prvků
RPS	Reference Point System – referenční měřicí systém
UD _i	User defined – uživatelské nastavení výpočtu v programu AutoForm Forming
Z100	zinková povrchová úprava (žárově, vrstva zinku 100g/m ²)

Seznam použitých jednotek:

Základní rozměry		
Značka	Veličina	Jednotky
R, r	Poloměr	mm
t	tloušťka	mm
A	Výška usazení objímky	mm
B	Výška usazení objímky	mm
C	Zanoření vn. plechu	mm
D	Pozice dr. profilu vůči hraně dílu	mm
h	Výška háčku	mm
a	Délka stojiny lemu	mm
b	Mezera mezi začátkem r lemu a okrajem vnitřního dílu	mm

Základní veličiny		
Značka	Veličina	Jednotky
F	Síla	N
A ₈₀	tažnost	%
R _m	Smluvní mez pevnosti	MPa
R _{p0,2}	Smluvní mez kluzu	MPa
r ₉₀	Anizotropie	-
n ₉₀	Exponent. Def. zpevnění	-
R	Vnitřní síla	N
P	Vnitřní síla	N
ε _i	Deformace	-
γ _i	Smyková složka deformace	-
p	Tlak	Bar
A _i	Deformační práce	J
V _i	Objem tělesa	mm ³
S _i	Plocha tělesa	mm ²

1 ÚVOD

Automobilový průmysl lze charakterizovat rychlým rozvojem, kde platí nepsané pravidlo „co nejrychleji, nejlevněji a nejkvalitněji“. V tomto odvětví strojírenství je největší důraz kladen na maximální optimalizaci výroby. Hlavním cílem je snižování výrobních nákladů, při zachování dostatečné kvality výrobků.

Karoserie automobilu se skládá z mnoha různých dílů a jeden z velkých problémů při vzniku karoserie se vyskytuje při spojování dvou či více plechových dílů karoserie. Největším problémem je zajistit rozměrovou stabilitu plechových dílů, které se mohou vůči sobě vzájemně posunout. Tento negativní jev se může projevit během dalších fází výroby, především v průběhu montáže, kdy díly nemusí správně lícovat. Proto je neustálá potřeba hledat nová inovativní řešení, která by měla zajistit dostatečnou rozměrovou stabilitu spojovaných dílů. V současné době již existují různé metody (např. metoda „želatinace“ = částečné vytvrzení lepidla, VarioPicker, atd.) a technologie, které v kombinaci s lemováním zajišťují rozměrovou stabilitu.

Doposud používané způsoby fixace lemů panelových dílů karoserie automobilu, se však vyznačují řadou výhod a nevýhod. Skoro všechny způsoby spojuje jedna výhoda a to je zajištění dobré rozměrové stability spojovaných dílů. Hlavní nevýhody u většiny metod je především jejich finanční náročnost a příliš „dlouhá“ doba výroby. Vysoká finanční náročnost je především z důvodu vysoké spotřeby energie na jednotlivé procesy a zároveň požadovaných vysokých investičních nákladů na zařízení pro jednotlivé metody. Další nevýhodou je jejich časová náročnost, kdy vzniká problém v nasazení u velkosériové výroby v podobě prodlužování výrobních časů, které je nežádoucí. Tato disertační práce více objasní problematiku fixace lemových spojů, popis jednotlivých metod souhrn jejich výhod a nevýhod, jejich vyhodnocení a především návrh nové metodiky v této oblasti za využití numerických simulací.

2 TECHNOLOGIE LEMOVÁNÍ V AUTOMOBILOVÉM PRŮMYSLU

Lemování je tvářecí technologie, která spočívá ve spojení dvou plechových dílů za využití plastické deformace. Hrany plechů jsou ohnuty, případně ohnuty přes druhý plechový díl tak, aby bylo docíleno těsného spojení. Obvykle se operace lemování používají ke spojování dílů, k docílení lepšího vzhledu dílu a zpevnění jednotlivých hran.

V automobilovém průmyslu, je technologie lemování používána během sestavování jednotlivých dílů karoserie automobilu ve výrobním úseku svařovny, kam jednotlivé plechové díly karoserie putují po úvodní fázi výroby v lisovně, kde se realizují výrobní technologie hlubokého tažení, stříhání a ohýbání. Karosářské díly, kde je využito lemování, se obvykle skládají z vnějšího a vnitřního dílu (viz Obr. 2.1). Typickými zástupci takových dílů, kde se používá tento typ spoje, jsou přední motorové kapoty, boční dveře, víka zavazadlového prostoru a blatníky. Stále pokračující vývoj lemovacích technologií vede k novým příležitostem pro vývoj produktů a novým aplikacím.

Výhody lemování:

- Možnost spojovat různé materiály (hliník, ocel, plasty)
- Zvýšení kvality produktu – vzhled, pevnost okraje produktu
- Ekologicky nenáročná metoda

Nevýhoda lemování:

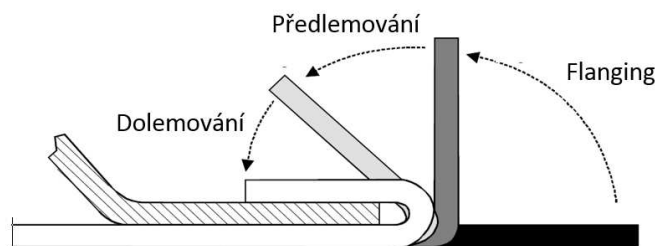
- Problém dosažení dostatečné pevnosti spoje pro udržení rozměrové stability spojovaných dílů

Popis lemového spoje

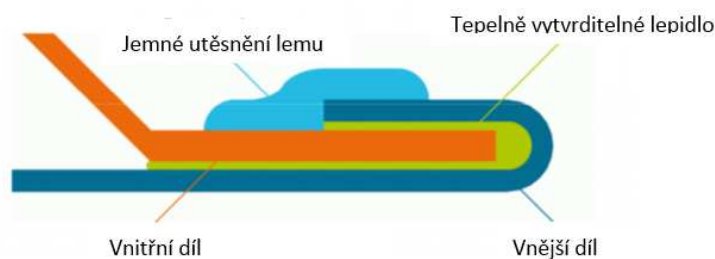
Pro lepší pochopení problematiky je nutné si podrobně popsat lemový spoj. Samotný lem je v podstatě „ohnutý okraj plechového dílu“. Lemování je proces, při kterém je tato hrana ohnuta. Při tom vzniká čistý a kompaktní spoj. Nicméně lemový spoj je méně pevný než svarový spoj. Velikou výhodou lemování je fakt, že tuto technologii je možné kombinovat s dalšími způsoby spojování, například lepením, aby se zvýšila pevnost spojů. [1]

Výrobní proces uzavřené sestavy začíná v lisovacích linkách, kde jsou jednotlivé díly sestavy lisovány. Vnější i vnitřní díl sestavy je vyhotoven hlubokým tažením s následným odstříháním přebytečného materiálu. Po odstříhání přebytečného materiálu, jsou ohnuty okraje (ty které mají být lemovány) vnějšího dílu. Tento proces se nazývá v anglickém jazyce

“flanging” vyplývající ze slova „flange“. „Flanging“ je tedy ohnutí okraje vnějšího dílu nejčastěji v úhlu přibližně 90° a tím vzniká tzv. stojina. Tento proces je zpravidla součástí procesu lisování dílů, kdy v rámci poslední operace v lisovací lince probíhá právě příprava stojen ohybem (tzn. tato fáze probíhá v oddělení lisovny). Následně, takto připravené díly jsou dále transportovány do speciální výrobní linky (nejčastěji v oddělení svařovny), kde jsou díly skládány a spojovány (např. při existenci více vnitřních dílů – výztuhy apod.) do sestavy, a jako poslední krok probíhá lemování. Před samotným procesem lemováním se na kontaktní plochy vnitřních i vnějších dílů musí aplikovat speciální lepidlo. Lepidla poskytují dodatečnou pevnost, ochranu proti korozi a tlumení rázů a vibrací pro budoucí uzavřenou sestavu dílu karoserie automobilu. Ve finální fázi dochází již k samotnému lemování, nejčastěji ve 2 krocích (v závislosti na tvarové složitosti dílů), ve speciálním zařízení. Daný produkt je konečně sestaven a po následné kontrole putuje do dalších fází výroby. [1]



Obr. 2.1 – Schéma lemování



Obr. 2.2 – Řez lemovým spojem

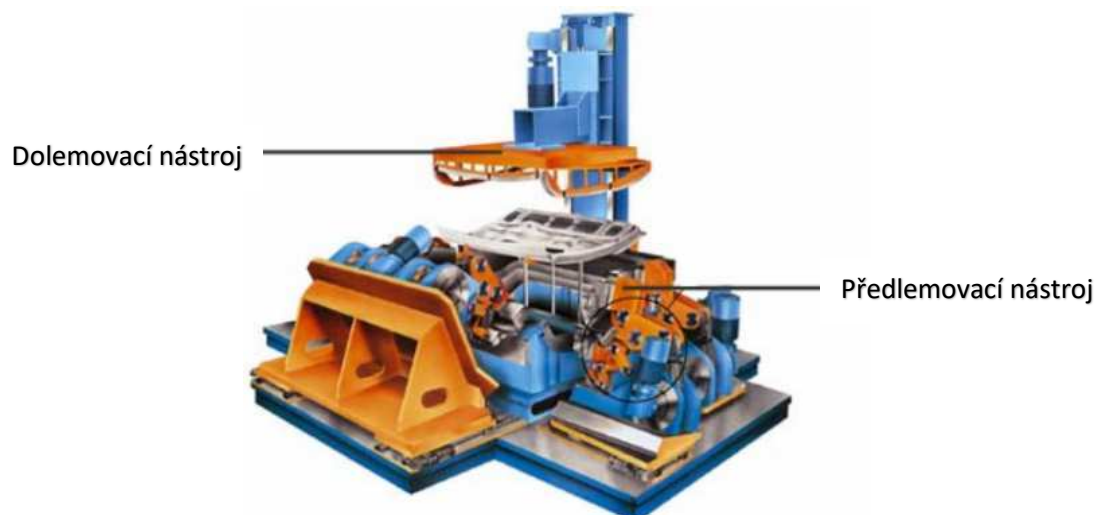
2.1 Nejčastěji používané metody lemování

V současné době existuje několik různých metod lemování. Různé metody lze rozlišit několika faktory, jako je například potřebná investice do zařízení, celková doba lemovacího procesu a technický koncept lemování.

Existují dva hlavní typy lemovacích procesů, které je možné dále rozdělit podle specifických změn základních konceptů jednotlivých výrobců zařízení. Pro případ disertační práce plně postačí popsání základního rozdělení. První metoda je tzv. konvenční lemování – „tabletop hemming“ a druhá metoda je robotické rolnové lemování – „roller hemming“. I přes jejich rozdíly, obě metody mají podobnost, která spočívá v rozdělení lemování do různých operací celého procesu: jeden nebo více kroků předlemování a jeden finální krok dolemování (viz obr. 2.1). To je prováděno tak, aby lemový spoj splňoval příslušné, především kvalitativní požadavky. Množství předlemovacích operací je závislé na úhlu otevření stojiny (flange angle) a na konkrétním typu procesu. Hlavní typy procesů jsou podrobněji popsány níže v podkapitolách 2.1.1 a 2.1.2. [1]

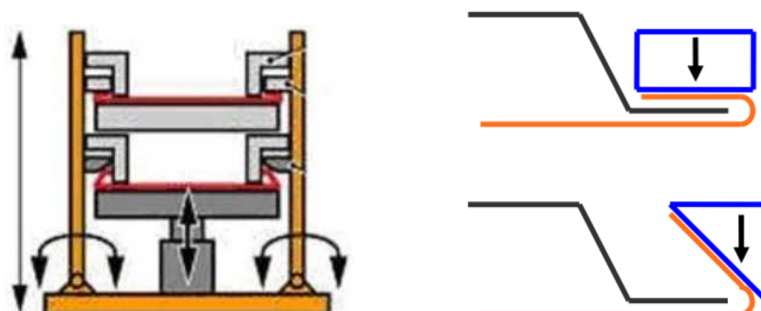
2.1.1 Konvenční lemování - „Tabletop hemming“

Konvenční - “Tabletop” lemování je vhodné pro sériovou výrobu s vysokým taktem. Během konvenčního lemování, je předohnutá stojina lemu přeložena po celé délce okraje lemovacím nástrojem. Obvykle je lemování výsledkem tvářecí operace, ve které je příruba deformována pomocí lemovacího nástroje. Vytvarovaná příruba je následně ohnutá v několika krocích. Tyto kroky zahrnují například předlemování a dolemování v závislosti na příslušném úhlu otevření příruby. Pro lemování, které vychází z příruby na vnějším dílu otevřené o 90°, se celý proces provádí ve dvou krocích (1. krok – předlemování; 2. krok – dolemování). Pro tento případ je potřeba zařízení, které obsahuje dva lisy (každý pro příslušný krok). Existuje mnoho různých konvenčních lemovacích systémů, které vynikají svými specifickými vlastnostmi. Dráha pohybu nástroje pro předlemování může být horizontální, vertikální nebo kombinace obou. Dráha pohybu nástroje pro lemování bývá pak většinou pouze vertikální. [2]

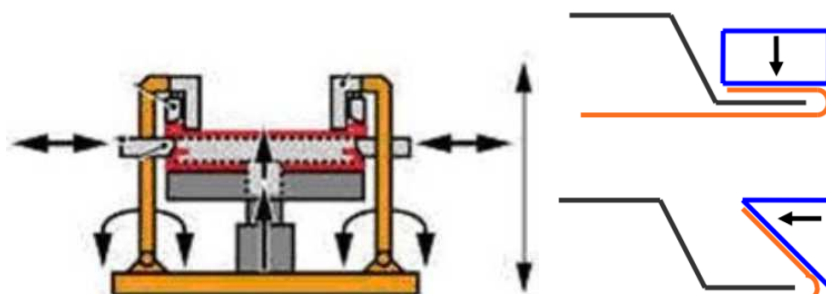


Obr. 2.3 – Konvenční lemovací zařízení [2]

Na obrázcích níže jsou znázorněny dva druhy konvenčních lemovacích systémů s vertikálním (Obr. 2.4) a horizontálním (Obr. 2.5) pohybem pro předlemování. Vnější díl je znázorněn na obrázku vždy červenou barvou. Předlemovací krok je na obrázku vždy v nižší poloze a finální dolemování je v horní poloze obrázku.



Obr. 2.4 – Vertikální lemovací systém [1]



Obr. 2.5 - Horizontální lemovací systém [1]

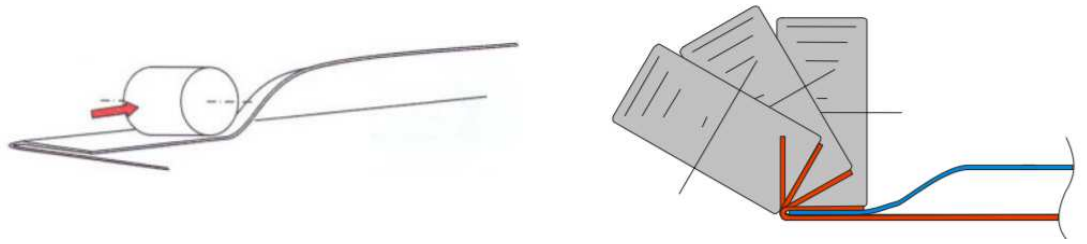
Pro každý produkt, v tomto případě se jedná o příslušný díl karoserie automobilu, je potřeba specifický lemovací stroj konstruovaný právě pro konkrétní díl. To přináší velkou nevýhodu v podobě vysokých investičních nákladů na každé zařízení.

2.1.2 Rolnové lemování

Při rolnovém lemování zpracovává průmyslový robot konstrukční díly pomocí válečkové - rolnové lemovací hlavy. Metoda se vyznačuje především svou flexibilitou. Zcela v duchu konceptu Průmyslu 4.0 může robot lemovat různé konstrukční díly. S jedním robotem je možno rychle realizovat jak výměnu rol, tak i jiné technologie. Kromě toho je pro lemování použitelné i hybridní řešení z obou systémů. Robotické rolnové lemování (Obr. 2.6) v porovnání s konvenčním lemováním je unikátní v naprosto odlišném přístupu k vyhotovení lemového spoje. Průmyslový robot, který je nezbytný pro tento typ lemování, vede lemovací rolnu, která je upnutá na robotické rameno. V závislosti na složitosti geometrie, lze stejnou rolnou zalemovat kompletně celý díl karoserie automobilu. Zároveň je možná i aplikace více robotů na jeden díl, tím lze celkově urychlit proces lemování. Rolnové lemování je možné také rozdělit na více kroků, stejně jak je tomu u konvenčního lemování, tedy na předlemování a finální dolemování. Mezi jednotlivými kroky se pouze změní orientace (osy) lemovací rolny (Obr. 2.7) a tím se mění úhel lemování. [1]



Obr. 2.6 – Rolnové lemování



Obr. 2.7 – Schéma rolnového lemování [1]

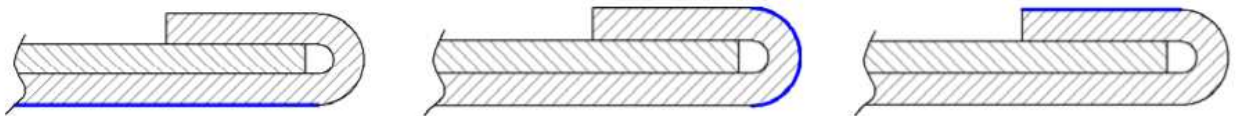
Ve srovnání s konvenčním lemováním, jsou hlavními výhodami tohoto procesu nízká úroveň investice pro každý nový produkt. Specifické výrobní zařízení pro daný produkt, které je potřebné pro rolnové lemování, je omezeno na minimum potřebných částí. Tím je proces vhodný pro výrobu mnoha různých částí, protože robot lze jednoduše přeprogramovat na jiný typ dílu. Nicméně doby výrobních cyklů u tohoto typu lemování jsou delší, protože lemový spoj vzniká postupným uzavíráním plechu pomocí pohybu rolny po definované dráze, která kopíruje vnější obvod dílu.

3 POŽADAVKY NA LEMOVÉ SPOJE - KVALITA A HODNOCENÍ LEMOVÝCH SPOJŮ

Kvalita a vyhodnocení lemových spojů se hodnotí z několika hledisek. Tyto hlediska se týkají jednak vizuálního aspektu a dále i aspektu rozměrového. Jednotlivá hlediska a kritéria jsou uvedeny dále podrobněji v této kapitole.

3.1 Kvalita povrchu

Hodnocení kvality povrchu lemu se vztahuje na tři hlavní oblasti znázorněné na Obr. 3.1 níže.



Obr. 3.1 – Oblasti lemového spoje (vnější oblast lemu, vnější rádius, vnitřní oblast lemu) [1]

Vnější a vnitřní oblasti lemu mohou vykazovat zvlnění nebo deformaci v oblasti spoje. Tyto vady se zpravidla vyskytují podél okraje/hrany panelového dílu. Ve vnějším zaoblení lemu se mohou projevit trhliny. Další specifické vady se mohou vyskytovat v rozích dílů. Vady spočívají v rostoucím zakřivení panelu blízko okraje. [1]

Povrch dílů je považován za vrstvu, která získá výrobním procesem odlišné vlastnosti a odlišný vzhled ve srovnání s původním povrchem nedeformovaného materiálu. Výsledná kvalita povrchu je určena nejen procesem tváření, ale je ovlivněna i během výroby, manipulace a přepravy.

Povrch karoserie s finálním lakem, zejména u pohledových dílů, musí splňovat estetická - auditová kritéria, protože i ty nejmenší vady lze pozorovat pouhým okem. Povrch dílů musí být přiměřeně lesklý, aniž by docházelo k rušivým vadám, jako jsou propady, škrábance atd.

Vysoký tlak lemovacího nástroje může způsobit otlaky, které se tvoří na viditelných površích tvarovaných plechů a mohou způsobit jejich změny na povrchu, což vede k následné reklamaci a znehodnocení během výroby.

Struktura kovového povrchu výrazně ovlivňuje výsledný efekt laku v konstrukci karoserií. Barva karoserie a její dokonalost včetně tvarů karoserie vytváří první zásadní dojem, který vede k zákazníkovi. Z tohoto důvodu je důležité zabývat se otázkami:

- Vliv povrchové struktury plechu na podmínky pro hluboké tažení
- Vliv kovové struktury na kvalitu laku

Struktura povrchu plechu v kombinaci s nástrojem používaným pro lisování a lemování určují určité předpoklady pro úspěšné tváření. Pokud vynecháme aspekty, které ovlivňují bezchybný proces lisování lemování, jako jsou praskání a nepřesnosti tvaru, je nutné se zaměřit na parametry povrchu plechu:

- Schopnost přenášet vysoké kontaktní tlaky bez nebo s minimálním poškozením při posunutí přes hrany s malým poloměrem
- Schopnost povrchu odolat vysokým kontaktním tlakům při kontaktu s nástroji
- Schopnost udržovat optimální množství maziva a zabránit poškození původní struktury

Jedná se o široké spektrum účinků, které nelze snadno srovnat a vyhodnotit.

Výběrem různých typů morfologie povrchu je možné ovlivnit sílu potřebnou k transformaci materiálu současně s koeficientem tření a možnou přítomností a velikostí zadření ve skutečném procesu tažení. Hodnocení makro geometrie povrchu není jednoduché, již z toho důvodu, že dva povrchy, které mají stejnou drsnost, v závislosti na dalších geometrických parametrech, mohou během tváření vykazovat různé koeficienty tření.

S nárůstem ostrých designových geometrií, se problematika morfologie povrchu stále prohlubuje a stává se stále více komplexní záležitostí, která neustále vyžaduje prohlubování již existujících znalostí v této problematice.

Ochranný povlak ocelových plechů

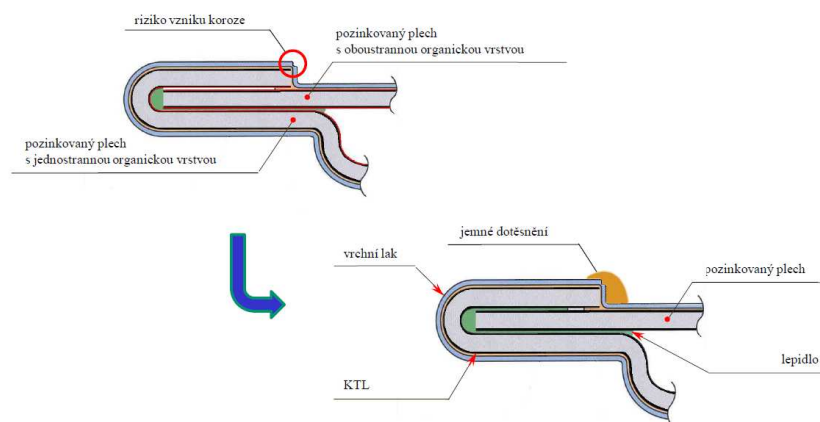
V automobilovém průmyslu se nejčastěji využívají plechy se zinkovou povrchovou úpravou.

Výhody zinkového povlaku jsou:

- Nízká cena
- Dobrá korozní ochrana

Zinek patří do skupiny kovů se sklonem k pasivaci. Při kontaktu s ocelí působí jako anoda a transformuje ocel do imunního stavu. Tento elektrochemický článek je podstatou ochrany oceli a jiných kovů před korozi. Ochranný účinek zinkové vrstvy na kov použitý při výrobě karoserií automobilů by měl významně zvýšit trvanlivost dílů proti korozi a významně oddálit korozi ve spojích a dutinách, kde je vrstva laku méně kvalitní.

K výrobě karoserií se často používají kovové plechy s žárovým zinkem nebo elektrolyticky zinkované s ochrannou vrstvou na jedné nebo obou stranách plechu. Pozinkované plechy mají vysokou odolnost proti korozi, avšak v procesu hlubokého tažení mají sklon k zadření, hrozí poškození ochranného povlaku a základního materiálu a porušení jejich soudržnosti. Aby se zabránilo zadírání, jsou pozinkované plechy opatřeny fosfátovým povrchem.



Obr. 3.2 - Řez lemovým spojem [3]

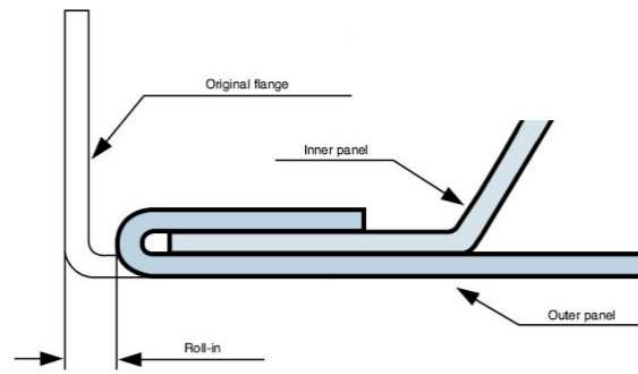
3.2 Rozměrová kvalita

Rozměrová kvalita panelových dílů karoserie je hlavně dána dvěma podmínkami/parametry – mezerou a tzv. plošným zarovnáním dílů. Tyto dva parametry jsou velice důležité podmínky týkající se lemování. [1]

3.2.1 Mezera pro zástavbu panelových dílů

Mezi panelovými díly karoserie vložené do kostry karoserie se nachází vždy určitá mezera, aby bylo možné jednoduše otevírat/zavírat jednotlivé díly. Obecným trendem v automobilovém průmyslu je snaha zmenšit tyto mezery na minimum, z toho důvodu je velmi důležité zajistit rozměrovou stabilitu spojovaných dílů a dále umět kontrolovat, předvídat tzv. roll-in a případně ho i kompenzovat.

Roll-in (Obr. 3.3) je definován jako vzdálenost mezi vnějším poloměrem lemu a původní stojinou vnějšího dílu. V ostrých rozích je možné dokonce i rozvinutí lemu. Hodnota parametru “roll-in” tedy nemusí být u produktu stejná. Pomocí různých metod lemování je možné dosáhnout různých hodnot tzv. roll-inu. U konvenčního lemování se roll-in pohybuje v rozmezí 0,6 ~ 0,8 mm a u rolnového lemování 0,0 ~ 0,2 mm.



Obr. 3.3 – Znázornění parametru Roll-in [1]

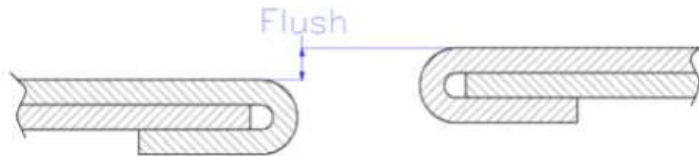
Mezera mezi panelovým dílem karoserie automobilu a zbytkem karoserie (v případě bočních dveří např. mezi dveřmi a bočnicí/postranicí automobilu) je standardně kontrolována v sériové výrobě pomocí měrek (Obr. 3.4). Mezera musí být rovnoměrně rozložená (mezera se musí rovnat po celém obvodu dílů). Samozřejmě to vše za předpokladu, že rozměrovost panelových dílů je dostatečně robustní.



Obr. 3.4 - Mezera mezi panelovým dílem a karoserií [1]

3.2.2 Plošné zarovnání panelů

Správná by měla být také vzdálenost ve směru normály mezi sousedními vnějšími panely, tento kontrolovaný rozměr/parametr se nazývá v anglickém jazyce “Flush”, lze volně přeložit jako “zarovnání” panelů (viz Obr. 3.5). Tento parametr by měl v ideálním případě nabývat nulové hodnoty. [1]



Obr. 3.5 - Zarovnání – “Flush” [1]

Chybné zarovnání ovlivní vzhled vozu a může v důsledku způsobovat i akustické problémy v průběhu jízdy vozidla, způsobené změnou aerodynamiky karoserie vozu, tedy změnou proudění vzduchu okolo karoserie. Tento typ vady může být způsoben mimo jiné i špatnou volbou lemovacích parametrů a (nebo) technologie, a v případě, že se tento jev projeví, je nutné optimalizovat/kompenzovat proces použitou lemovací technikou a parametry, případně i kompenzovat tvar lisovací operace. [1]

I když některé z výše uvedených defektů lze jen těžko detekovat přímo po lemování, mohou být viditelné, jakmile je panelový díl nalakován. Některé vady lemování jsou kombinací rozměrového problému a problému kvality povrchu. Odpružení a porušení vnějšího povrchu může vést i k vadě popsané výše – špatnému zarovnání, kdy nesesí plošný rozměr ve směru normály od povrchu dílu vůči referenční geometrii. [1]

Přesnost operace lemování je velmi důležitá, protože ovlivňuje vzhled povrchu a kvalitu povrchu. Deformace materiálu, ke kterým dochází během procesu lemování, mohou vést k rozměrovým změnám a dalším vadám součástí. Proto je důležité používat simulační nástroje, aby se na jedné straně lépe porozumělo procesu lemování a na druhé straně se výrazně snížil počet smyček „pokus a omyl“ během zapracování a výroby.

3.3 Příklad auditové kontroly po lemování v reálném provozu

Níže je popsán proces auditu vyplývající z interních školících materiálů firmy Škoda Auto a.s.: [4]

Jako audit se označují kontrolní prohlídky, které slouží k vyhodnocení procesů z hlediska splnění zadaných požadavků a směrnic. Nejčastěji se provádí v rámci systému řízení kvality. Audity provádějí speciálně vyškolení auditoři. Při auditu se zpravidla brouskují díly pomocí brousků a smirkového papíru. Díky této metodě lze odhalit povrchové chyby dílu, které při běžném pozorování zrakem nejsou viditelné, ale na lakovaném díle se dopadem světla okamžitě objeví.

Plán brouskování:

Plány brouskování popisují, jakým způsobem je třeba díl brouskovat. Jsou zde graficky znázorněny a popsány brouskovací makety a používané brousky. V závislosti na typu dílu se směr brouskování řídí tvarem dílu a velikost brousku brouskovanou plochou. Na místech, kde není možné brousek použít, se používají smirky. Smirky nejsou vhodné pro velké plochy, protože se přizpůsobují povrchu a není tak možné odhalit povrchové vady. [4]

Vůz se rozdělí do jednotlivých oblastí, v nichž se provádí odlišné hodnocení dílů. Rozlišuje se mezi: [4]

- Zóna 1:
 - Zahrnuje všechny plochy, na kterých jsou výrazně rušivé a velmi nápadné nerovnosti (karoserie vnitřní a vnější)
- Zóna 2:
 - Zahrnuje všechny plochy, na kterých nejsou nerovnosti bezprostředně nápadné (karoserie vnitřní a vnější)
- Zóna 3
 - Zahrnuje všechny zakryté plochy, které jsou při používání vozu viditelné pouze zřídka nebo na krátko
- Nepojmenovaná zóna
 - V případě nepojmenované zóny není popsána žádná určitá oblast. Chyba se vyhodnocuje nezávisle na zóně a může se vyskytnout na celém voze.

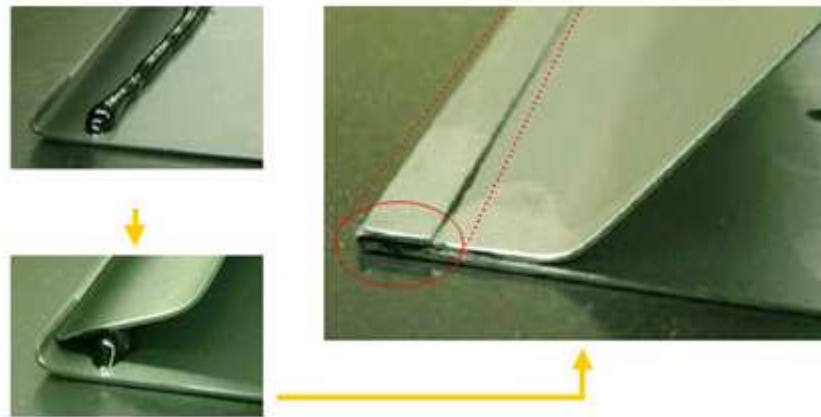
Jednotlivé vady lze kategorizovat do skupin A-/B-/C-: [4]

- A-chyby
 - Jsou pro zákazníka neakceptovatelné chyby, které spolehlivě vedou k reklamačnímu řízení (interně, externě) a/nebo jsou spojeny s bezpečnostním rizikem. A-povrchové chyby jsou viditelné silné odchylky od zadání, které jsou zjevné i neškolenému zákazníkovi.
- B-chyby
 - Jsou rušivé chyby, u kterých lze očekávat, že povedou k reklamaci (interně, externě). V zásadě to znamená všechny povrchové chyby zjistitelné dotykem nebo zrakem i velké chyby pasování. V kritických oblastech mohou hodnocení povrchu podpořená brouskováním vést ke vzniku B-chyby.
- C-chyby
 - Jsou chyby, které vyžadují nápravu, u kterých lze očekávat reklamaci u náročných zákazníků, pokud je jejich výskyt častější.

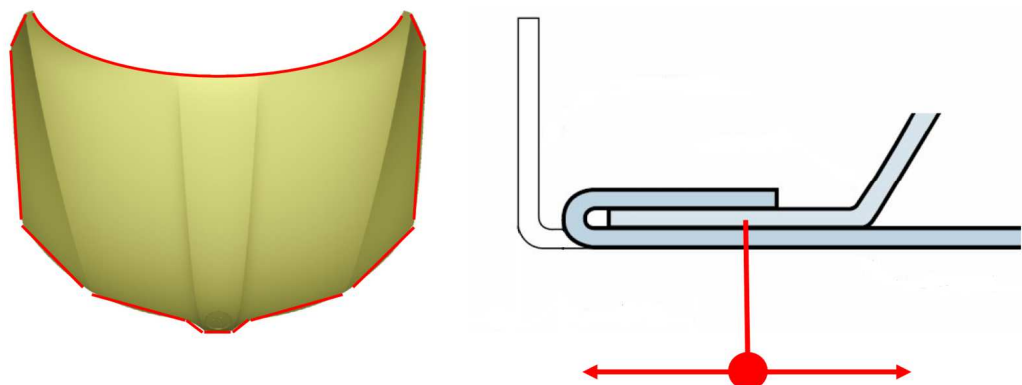
Na základě rozdělení zón a bodovacího klíče se přidělí chybové body. Přidělené body se poté sečtou a na základě celkového součtu se podle "klíče tříd kvality" odvodí známka pro daný díl. Shrnutí jednotlivých chyb a počet bodů se zdokumentuje "auditové zprávě", přidělí se auditová známka a zarchivuje. [4]

4 FIXACE LEMOVÝCH SPOJŮ PANELOVÝCH DÍLŮ KAROSERIE AUTOMOBILU

Fixace lemových spojů slouží ke stabilizování vzájemné polohy vnitřního svařence panelu a povrchového plechu panelu během výrobního procesu až do lakovny, kde hlavní stabilizační funkci převezme vytvrzené lemové lepidlo po průchodu karoserie KTL, tedy kataforetickým lakováním (Obr. 4.1). Samotný způsob fixace dále slouží k udržení požadovaného rozměru i během tvrdnutí lepidla, kdy mohou dočasně působit různá pnutí vlivem tepla na lemový spoj. Na Obr. 4.2 je znázornění možného pohybu vnitřního plechového dílu vůči vnějšímu a právě fixace lemového spoje slouží k zamezení takového pohybu.



Obr. 4.1 - Lemové lepidlo mezi vnitřním a vnějším plechem



Obr. 4.2 Možnost posunu vnitřního plechu vůči vnějšímu v lemovém spoji

S ohledem na problematiku panelových dílů karoserie automobilu a na vysokou sériovost výroby je nutné dodržet některé požadavky vstupující do problematiky fixace lemových spojů. Hlavními požadavky na fixaci je především zajištění dobré rozměrové stability spojovaných dílů. To znamená, že konkrétní aplikovaná metoda fixace musí zajistit dostatečnou pevnost lemového spoje a tím zamezit pohybu dílů vůči sobě. Daná metoda však nesmí porušovat povrchový díl panelového dílu. V této souvislosti dochází ke střetu s problematikou panelových dílů karoserie automobilu. Každý vnější pohledový díl karoserie musí být kvalitativně nezávadný, sebemenší poškození či narušení povrchu tohoto dílu se může projevit v narušení kontinuity z celkového dojmu nalakovaného dílu, kde budou zřetelné všechny vady. Proto aplikovaná metoda fixace lemového spoje musí být realizovaná tak, aby vnější pohledový díl nebyl poškozen. Dalšími hlavními požadavky je celková nízká energetická náročnost, zajištění co nejkratších výrobních časů a nízké investiční náklady na technologické zařízení pro danou metodu fixace. [5, 6]

5 SOUČASNÝ STAV FIXACE LEMOVÝCH SPOJŮ PANELOVÝCH DÍLŮ KAROSERIE AUTOMOBILU

Mezi plechové díly se obvykle nanáší lepidlo, které ve vytvrzeném stavu zabraňuje relativnímu pohybu mezi spojovanými díly a celkově zpevňuje lemový spoj. Obvykle během sestavování dílů však nemusí nutně dojít k vytvrzení lepidla, dokud není kompletace karoserie vozidla kompletní. Z toho důvodu, aby se zabránilo posunutí panelů během operace montáže, mohou být tedy implementovány různé metody fixace, aby se snížila míra relativního pohybu mezi panely poté, co došlo k lemování – tedy vytvoření jednoho z celků karoserie automobilu jako jsou např. boční dveře či přední kapota vozidla. [1]

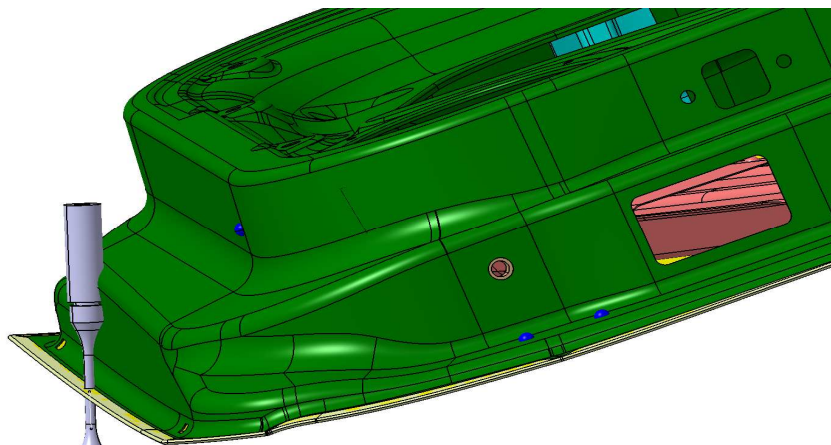
Fixace lemů slouží ke stabilizování vzájemné polohy vnitřního svařence panelu a povrchového plechu panelu během výrobního procesu až do lakovny, kde stabilizační funkci převezme plně vytvrzené lemové lepidlo po průchodu karoserie KTL. V současné době se používají různé metody pro fixaci lemů plechových dílů karoserie automobilu, jako jsou boční dveře, přední kapota a víko kufru automobilu. Každá z jednotlivých metod má své specifické výhody a nevýhody, dále jsou rozdíly v aplikovatelnosti jednotlivých metod v závislosti na velikosti, složitosti a jakosti konkrétního dílu. Podrobnější přehled metod fixace je dále uveden v textu v dalších kapitolách.

5.1 Metody využívající teplo/svařování/pájení

5.1.1 Odporové bodové svařování

Se sériovou výrobou samonosných karoserií vyvstal problém spojování plechových výlisků, které mají určitou rozměrovou přesnost, do svařenců, které budou co nejpřesnější. Při mechanizování spojovacích činností se ukázalo, že jednou z výhodných technologií je odporové svařování (Obr. 5.1), které umožňuje v určité míře kompenzaci některých nepřesností při výrobě dílů. Svařovací přípravky a středofrekvenční svařovací kleště upevněné na robotech, v kombinaci s odolnými svařovacími elektrodami využívají téměř všechny automobilové společnosti. Snaha o používání velmi pevných materiálů vede k použití materiálů s vyšším obsahem uhlíku, mnohdy až na samé hranici svařitelnosti, a někdy i nad ní. Dotování ocelových plechů legurami, např. i Al, vede následně k obrovskému zpevnění a bodování takových materiálů je velice náročné. Je pak často nutné kombinovat svařovací parametry z oblasti

tvrdého i měkkého režimu svařování pro dosažení požadovaných parametrů bodových spojů. [5, 7]



Obr. 5.1 - Zajištění plechů proti pohybu bodovým svařováním

Pevné spojení lemované příruby konstrukčního dílu karoserie vozidla je vytvořeno, když spojovací elektroda je za určitého přítlaku tlačena ve směru proti zalemované přírubě prvního dílu. Zároveň je uzemňovací elektroda tlačena ve stejném směru proti druhému dílu, který vyčnívá svým okrajem do lemové kapsy vytvořené na prvním díle prostřednictvím zalemované příruby. Oba díly jsou v oblasti kontaktu se spojovací elektrodou lokálně teplotně pevně spojeny, přičemž oba díly mají vzájemný celoplošný kontakt při tomto pevném spárovém spojení v oblasti zalemované příruby. [7]

5.1.2 MIG pájení

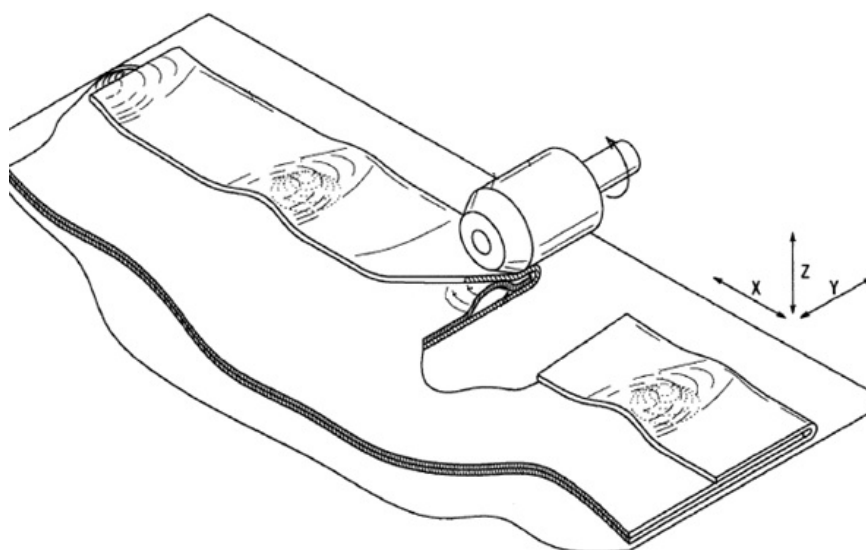
Další alternativní metodou zajištění fixace lemového spoje je technologie MIG pájení (Obr. 5.2). Je to metoda tvrdého pájení známá v automobilovém průmyslu již od 70. let minulého století. Základní rozdíl oproti MAG svařování spočívá v použití tvrdých, resp. vysokoteplotních pájek, např. bronzových drátů (CuSi_3 , CuAl_8 apod.), jako přídavného materiálu, kdy zdrojem tepla potřebného pro tavení pájky je elektrický oblouk generovaný standardním MIG/MAG svařovacím zdrojem. Předpokladem pro optimální spoj je natavení pouze pájky, nikoli základního materiálu. To znamená, že spojení odpovídá typickému pájenému spoji. Díky nízké teplotě tavení použité pájky se zinková vrstva, která plní funkci korozní ochrany, sice nataví, nicméně odpařuje se pouze nepatrně a zůstává tak do značné míry neporušená. Bez zinkové ochrany tak zůstává jen tenká mezera mezi bronzovou housenkou a neporušeným okolním základním materiálem, který je však do značné míry chráněn díky schopnosti katodické ochrany Zn. Pro zajištění fixace lemových spojů je využíváno malých pájených bodů po obvodu hrany lemu. [7, 8, 40]



Obr. 5.2 - Fixace lemu průvarem pomocí technologie MIG pájení

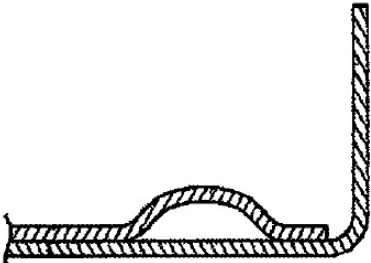
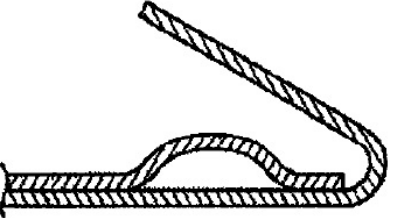
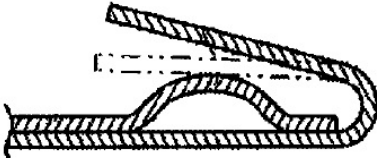
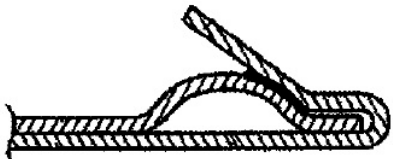
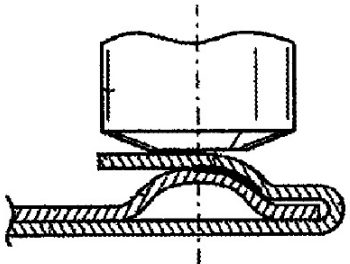
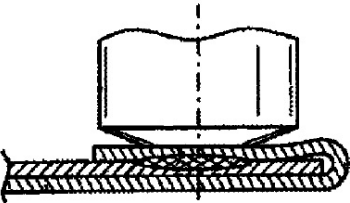
5.1.3 Lemování s výstupkovým svařováním

Na plechovém plátu, který se definuje jako vnitřní plechový díl, jsou vytvořeny výstupky. Tyto výstupky při pohledu shora odhalují pravidelný kruhovitý tvar. Pomocí lemovací rolny je postupně docíleno k přelemování druhého dílu plechu (Obr. 5.3). Ve druhé fázi procesu se za pomoci speciálních čelistí výstupky stlačí, během této fáze výstupky slouží jako koncentrátoři napětí a pomocí stlačených čelistí se uzavře el. obvod a dochází k odporovému svaření spojovaných dílů. Tento patent byl registrován již v r. 2007, firmou Honda Motors v Japonsku.[9]



Obr. 5.3 - Lemovací rolna [9]

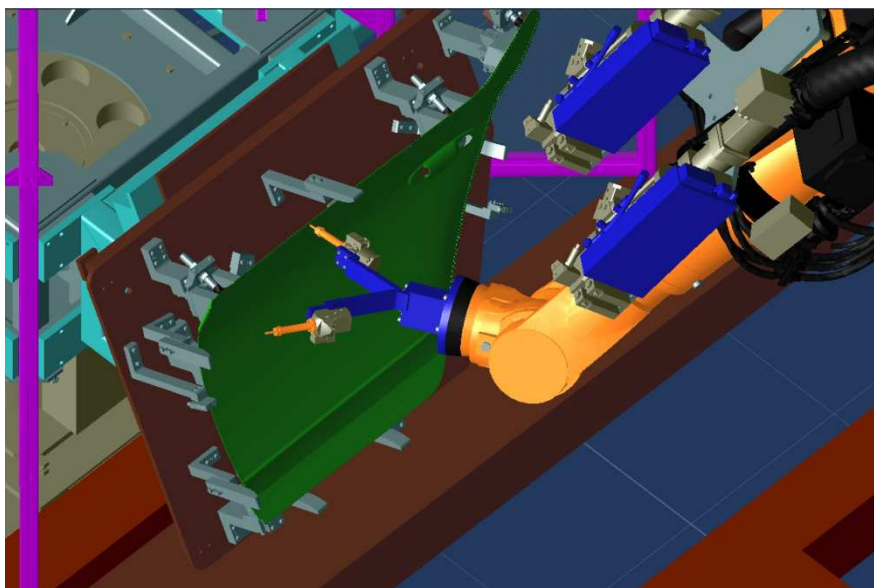
Tab. 1 Postup výrobního procesu při lemování s výstupkovým odporovým svařováním [9]

Operace	Schéma výrobního procesu
Základní poloha	
Spoj po přípravném ohýbání	
Spoj po druhém ohybu	
Spoj po dokončení pohybu lemovací rolny	
Uzavření elektrického obvodu	
Vytvoření svaru bodového svaru výstupkovým svařováním	

5.1.4 Technologie částečného vytvrzení lepidla - „želatinace“

Z důvodu požadavku na fixaci dílů se využívají způsoby „želatinace“, které se zakládají na principu částečného vytvrzení lepidla indukčním ohřevem. V současné době se pro fixaci lemů používá více druhů lepidel a pojiv. Každý druh lepidla má své specifické vlastnosti, proto je nutné lepidlo vybírat podle požadovaných vlastností daného spoje. Nejčastěji je vyžadována těsnost, odolnost vůči korozi, pevnost, tuhost, rozměrová stálost (-nesmí se deformovat vzhledový díl). Požadavky splňují například polyuretany, syntetické kaučuky či PVC. [2, 10, 11]

Konkrétní řešení pro zlepšení antikoročních vlastností okrajových lemů se používají tzv. pseudotvrzená lepidla (Obr. 5.4), které sestávají z jednosložkové epoxidové pasty obsahující malé polymerní akrylové částice. Používaná lepidla mohou být tvrzena indukčním ohřevem (Obr. 5.5) po té, co je spoj zalemován a následně po procesu montáže a lakování se uskutečňuje kompletní vytvrzování ve vypalovací peci lakovny. V případě ruční manipulace s hotovým zalemovaným dílem po želatinaci, je velikou nevýhodou této metody to, že díl zůstává po indukčním ohřevu lokálně zahřátý na vysokou teplotu a dříve než je možné s ním ručně manipulovat, je nutné ho nechat na vychladnout na vhodnou teplotu. Tím vznikají prodlevy ve výrobě. Ruční manipulací se rozumí zakládání hotových dílů do palet, které následně putují do dalších pracovišť oddělení svařovny. V případě využití různých materiálů jednotlivých dílů panelového dílu je nutné i sledovat deformace způsobené působením tepla na díly. [5, 11]



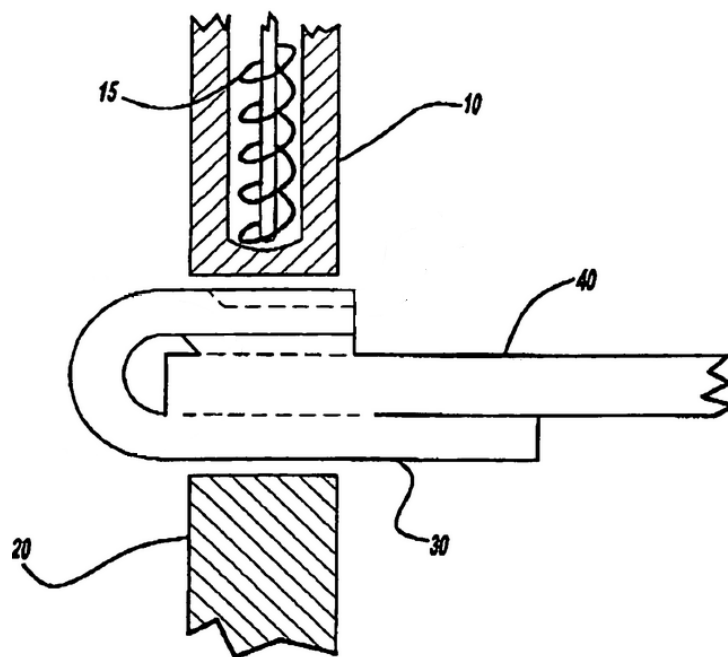
Obr. 5.4 - Robotické nanášení lepidla na vnější plechový díl dveří automobilu



Obr. 5.5 - Přípravek želatince motorové kapoty modelu SK251

5.1.5 Fixace lemových spojů elektromagnetickým pulzním svařováním

Tato metoda je popsána v patentu vedeném pod „US20050109769A1“, který byl přihlášen v r. 2003 firmou „Daimler Chrysler Co LLC“. [12] Podstatou této technologie je kombinace lemovacího zařízení, které přímo vytváří lemový spoj a metody fixace, která nevytváří deformace, které by měly negativní dopad na kvalitativní audit. Lemování se v tomto případě vytváří klasickým konvenčním způsobem pomocí lemovacích vložek, ve kterých je umístěna elektromagnetická cívka. Samotná fixace v lemovém spoji mezi vnějším a vnitřním plechovým dílem vznikne pomocí elektromagnetického pulsního svařování, při finálním dotlaku lemovací vložky na spojované díly. [12]



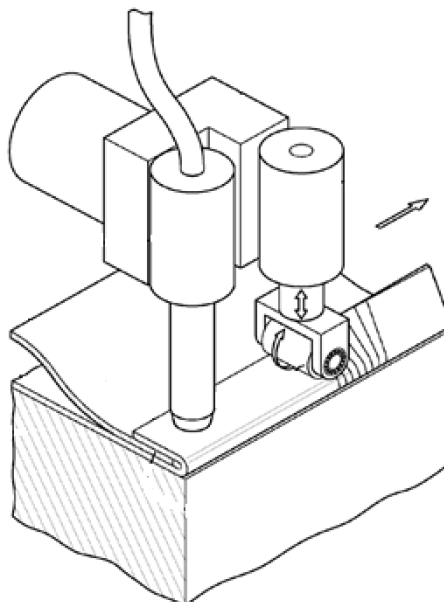
Obr. 5.6 - Schématický pohled na elektromagnetickou fixaci lemového spoje [12]

Obrázek 5.6 reprezentuje zjednodušené schéma lemovacího zařízení elektromagnetické metody fixace lemového spoje. Lemovací vložka 10 má uvnitř dutinu, ve které je umístěna elektromagnetická cívka 15, tak aby byla schopna pulsně svařit vnější plechový díl 30 a vnitřní plechový díl 40, které jsou usazeny v sobě na lemovací loži 20, která kopíruje tvar vnějšího dílu, může obsahovat pneumatische přísavky a slouží k pevné podpoře spojovaných dílů. [12]

5.1.6 Rolnové lemování s kontinuálním vytvrzováním lepidla

Metoda je popsána v patentu vedeným pod „US8341992B2“, který byl přihlášen v r. 2010 firmou General Motors (konkrétně „GM Global Technology Operations LLC“). [13] Metoda přímo kombinuje rolnové lemování a fixaci lemového spoje pomocí kontinuálního vytvrzování lepidla. Hlavní díly sestavy panelových dílů jsou sesazeny k sobě a pevně založeny na tzv. lemovacím loži, které představuje pro díly pevnou podporu pro samotnou operaci lemování, která je provedena pomocí metody rolnového lemování. Hlavní rozdíl oproti klasickému rolnovému způsobu lemování je v tom, že na rolnové hlavě je zároveň umístěno speciální zařízení pro vytvrzení lepidla. Toto zařízení (Obr. 5.7) se tedy pohybuje společně s rolnovou hlavou a v těsném závěsu, po dokončení operace lemování, dochází k alespoň částečnému vytvrzení lepidla v lemovém spoji. [13]

Samotné zařízení pro vytvrzení lepidla může být jakýkoliv typ ohřívacího zařízení, které je schopno vyprodukovat a přenášet lokální teplo. Například to může být indukční ohřev, ohřev el. odporem, pomocí laserového paprsku, plamenem apod. Konkrétní typ ohřevu není v tomto patentu specifikován, a tudíž by měl být vhodně zvolen odborníkem na základě vstupních podmínek, jako je například materiál lemovaných dílů apod. [11, 13]



Obr. 5.7 - Proces dolemování rolnou a vytvrzení lepidla [13]

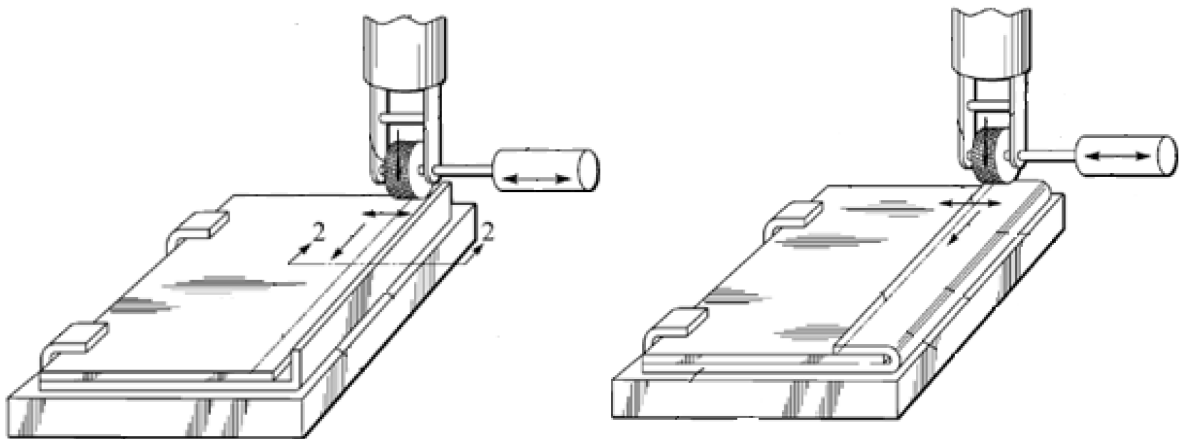
5.1.7 Fixace kombinací rolnového lemování a ultrazvukového svařování

Tato metoda byla opět registrována firmou General Motors a to v r. 2011. [14] Tato konkrétní metoda fixace lemového spoje je rozdílná v postupu hlavních kroků pro vytvoření pevného lemového spoje. Většina ostatních zmiňovaných způsobů fixace lemového spoje má hlavní společný rys v tom, že nejdříve proběhne samotné lemování a až v následném kroku proběhne fixace spojovaných dílů v lemovém spoji. Tato metoda má tyto hlavní dílčí kroky obráceně, tzn. nejprve dojde k fixaci vnitřního dílu vůči vnějšímu a až ve druhém kroku probíhá samotné lemování již zafixovaných dílů, poté může následovat opět krok fixace vnější přelemované stojiny k vnější straně vnitřního dílu. [14]

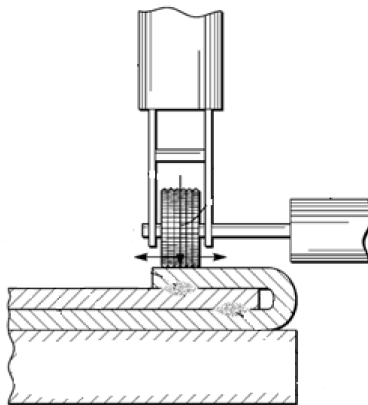
Samotná fixace probíhá pomocí ultrazvukového svařování, kdy svářečka má tvar vibrující rolny, která je roboticky řízena a pohybuje se kontinuálně po dráze v oblasti, kde má vzniknout lemový spoj. Tento způsob fixace probíhá tedy dvakrát, nejdříve na „první vrstvě“

po založení spojovaných dílů do sebe a finální svar vzniká po samotném lemování na „druhé vrstvě“ (Obr. 5.8 a Obr. 5.9). [14]

Metoda umožňuje využití i přímé kombinace rolnového lemování společně s fixací, tak že samotná vibrující svařovací rolna, dokáže vyvinout dostatečnou sílu od robotického ramene, a to znamená, že daný nástroj je možné použít místo klasické rolny pro finální průjezd potřebný k vytvoření lemového spoje. Ve stejnou chvíli dochází i k samotnému vytvoření svaru mezi zalemovanou stojnou vnějšího dílu a horní plochou vnitřního dílu.



Obr. 5.8 – Princip fixace lemového spoje s využitím ultrazvukového svařování [14]



Obr. 5.9 – Pohled v řezu na ultrazvukovou metodu fixace lemového spoje [14]

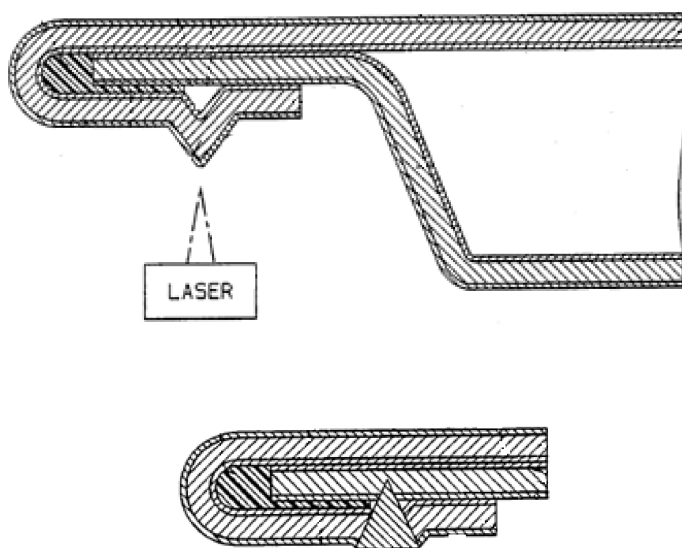
5.1.8 Fixace laserem

U panelových dílů karoserie automobilu, jak již bylo řečeno, se používá speciální tepelně vytvrditelné lepidlo. Existuje mnoho různých typů lepidel s ohledem na dobu nutnou pro vytvrzení. Cena/náklady na konkrétní typ lepidla závisí právě na době jeho vytvrzení. Rychleschnoucí lepidlo (indukčně vytvrzovaná epoxidová pryskyřice) je obecně dražší než pomalu vytvrzující lepidlo (tepelně vytvrzovaná epoxidová pryskyřice) a pro rychlé vytvrzení

lepidla vyžaduje indukční ohřívací zařízení. Z toho vyplývá, že ekonomicky výhodnější je využití pomalu tuhneícího lepidla. [15]

Použití pomalu tuhneícího lepidla přináší určité problémy. Před vytvrzením se tedy vnitřní a další panely mohou vzájemně posunout a nevytvrzené lepidlo neposkytuje dostatečnou strukturální integritu pro zavěšení dveří. Zajištění strukturální integrity a posunutí panelu je zabráněno provedením několika bodových svarů mezi panely, ale tento postup může vyžadovat kovovou úpravu (broušení) konců bodových svarů tak, aby nebyly viditelné na povrchu vnějšího panelu. [15]

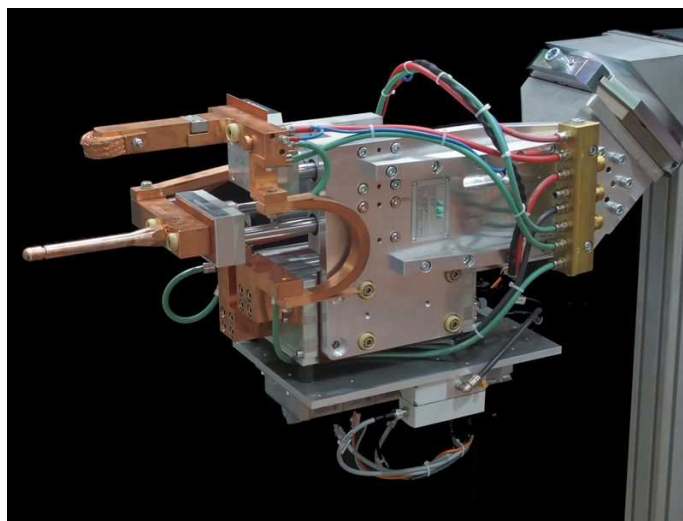
Cílem řešení je poskytnout alternativní způsob výroby lemových spojů, kde se využívá laserové svařování vnitřních a vnějších kovových panelů, kde svar neproniká na povrch vnějšího dílu sestavy, čímž se eliminuje potřeba dokončovací operace vnějšího povrchu z důvodu auditové nezávadnosti. Jak samotný název kapitoly napovídá, hlavní podstatou fixace je laserové svařování. Pro tento typ svařování, musí být tvar stojiny lemu připraven tak, aby mohlo docházet k úniku plynů generovaných během laserového svařování (Obr. 5.10). Tím se zabrání tomu, aby plyn způsoboval pórovitost svaru. Na stojině lemu jsou vyhotoveny speciální výstupky ve tvaru písmene V, které jsou laserem přivařeny k vnitřnímu panelu, a které svým tvarem poskytují potřebný kanál pro únik plynu. Fixace laserem byla poprvé popsána v patentu vedeném pod „US4916284A“, který registrovala firma „Moters Liquidation Co“ v r. 1989. [15, 16]



Obr. 5.10 – Fixace lemového spoje laserem [15, 17]

5.1.9 VarioPicker

Metoda je určena k automatické, roboticky řízené fixaci lemových spojů. Fixace pomocí této metody opět nahrazuje indukční vytvrzení lepidla v lemových spojkách. Metoda fixace je založena na principu odporového svařování, s tím rozdílem, že zde nedochází k přímému sevření spoje, pomocí svařovacích kleští, ale jsou využity speciální elektrody, které jsou zobrazeny na obrázku č. 5.11 a 5.12. Takovým způsobem nedochází k plnému průvaru všech dílů v lokaci bodového spoje, ale dojde ke spojení pouze mezi zalemovanou stojinou vnějšího dílu a horní plochou vnitřního dílu sestavy. Celý systém VarioPicker disponuje i servisní stanicí, kde probíhá automatická výměna čepičky elektrody. [17]



Obr. 5.11 – Zařízení pro metodu VarioPicker [17]

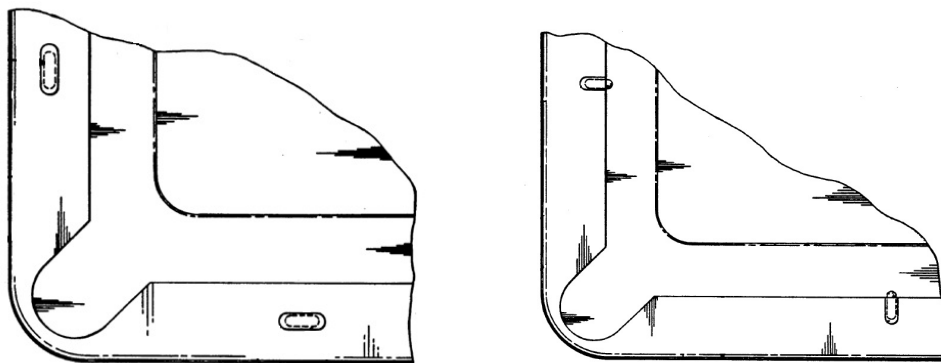


Obr. 5.12 – Detail na proces fixace lemového spoje metodou VarioPicker [17]

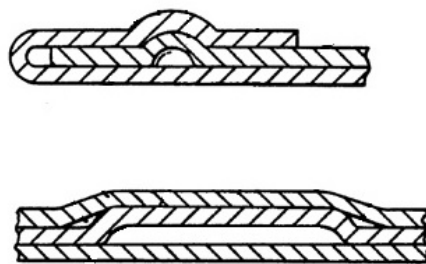
5.2 Mechanické metody fixace lemových spojů

5.2.1 Technologie příčných a podélných výstupků

Metoda byla popsána a patentována již v roce 1993 americkou společností General Motors Corporation v Detroitu. Jeví se obdobně jako metoda zámkových výstupků (viz kapitola 5.2.3 níže). Tedy základní princip spočívá v lemování vyvýšených výstupků na vnitřním plátu vnějším plátem. Jednotlivé výstupky jsou pravidelně po určitých intervalech umístěné po celé délce okraje vnitřního plechu. Výška vyraženého výstupku se rovná tloušťce vnitřního plechu, dále patent definuje dvě základní možnosti orientace výstupků. To je patrné z Obr. 5.13 níže. [18]

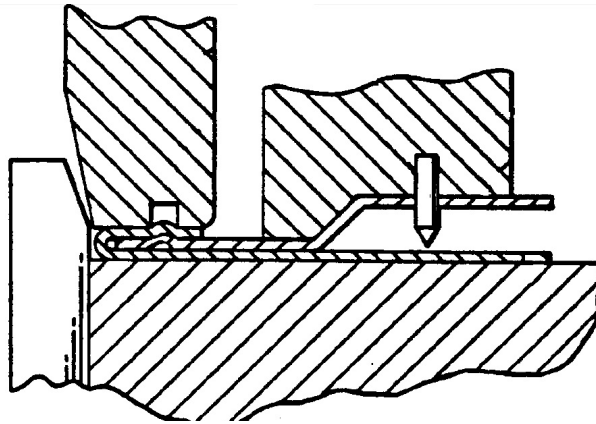


Obr. 5.13 - Orientace výstupků [18]



Obr. 5.14 - Příčný a podélný řez výstupkem [18]

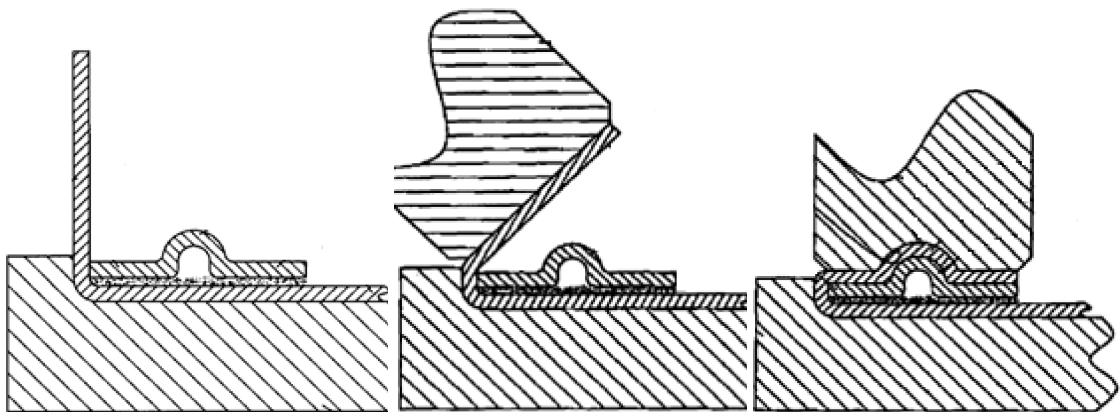
Hlavním rozdílem s technologií zámkových výstupků je právě tvar (Obr. 5.14) a orientace výstupků a samotný způsob lemování. Zatímco u technologie zámkových výstupků je vytvořený výstupek částečně deformován, u této metody se výstupek nedeformuje. Nástroj pro dokončení operace lemování je tvarován tak, aby právě deformaci výstupku zabránil. V nástroji je vytvořena dutina, která umožňuje vyplnění svého prostoru, zatímco v celém okolí výstupku, v důsledku tlakové síly, je vnější část plechu dolemována k vnitřní části. [18]



Obr. 5.15 - Způsob lemování ve tvarovém nástroji [18]

5.2.2 Fixace dutinovou vložkou

Metoda byla popsána poprvé v roce 2003 patentem vedeným pod "US20050102817A1" firmou Ford Global Technologies LLC. [19] Metoda zajišťuje zablokování všech stupňů volnosti vnitřního dílu pomocí mechanického „zámku“ a lepidla. Tato kombinace nejen že zajišťuje rozměrovou stabilitu dílů, ale také zamezuje problémům spojeným s korozí a povrchovými vadami. Mezi vnitřním dílem a vnějším dílem je umístěno více mechanických „zámků“, přičemž každý mechanický zámek obsahuje vyvýšený kruhový výstupek, který je na vnitřní díl vyražen v oblasti, která bude pod zamýšleným lemem vnějšího dílu. Během finální fáze konvenčního lemování, je použita speciální dolemovací vložka, která obsahuje dutiny, kopírující tvar vyražených výstupků vnitřního dílu. Během samotného dolemování je následně ohýbaná stojina formována pomocí dolemovací vložky a zpevněných výstupků na vnitřním díle. Takovým způsobem se vnější stojina lokálně vytvaruje přesně podle vyražených výstupků a tím vzniká mechanické uzamčení, blokující pohyb obou dílů vůči sobě ve všech směrech (Obr. 5.16). [19]

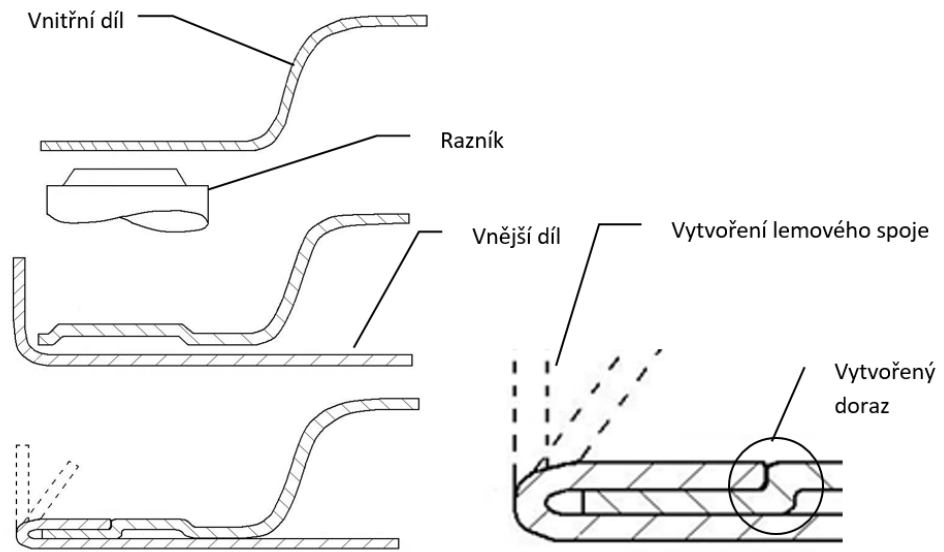


Obr. 5.16 - Fixace dutinovou lemovací vložkou [19]

5.2.3 Metoda zámkových výstupků

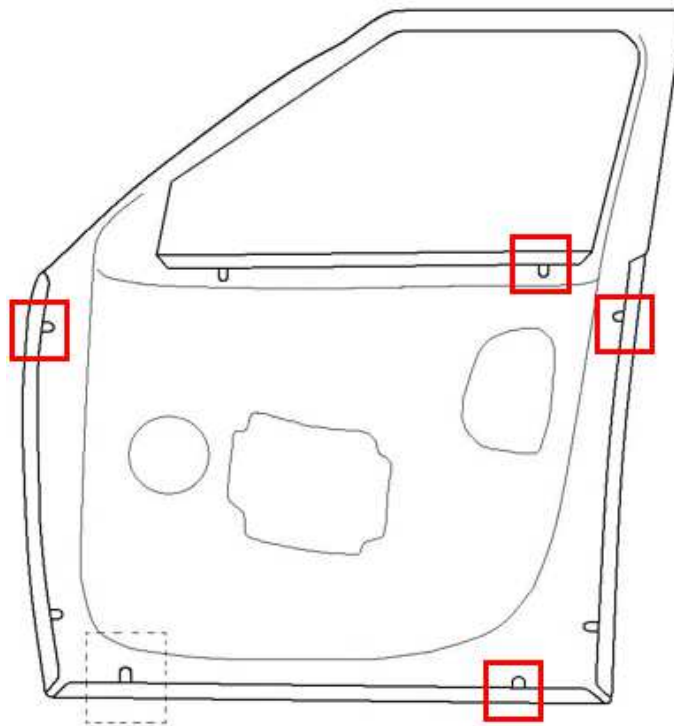
Technologie Sperrbuckel (dále jen „zámkových výstupků“) byla vyvinuta firmou Škoda Auto a.s. v r. 2011 pro použití v automobilovém průmyslu proto, aby byla zajištěna vzájemná stálost polohy vnitřního svařence dveří a povrchového výlisku. Zalemovaný panelový díl si musí během výrobního procesu zachovat rozměrovou stabilitu, k čemuž zámkové výstupky díky zamezení pohybu v lemované části výrazně přispívají. Tato mechanická metoda způsobuje celkové zefektivnění výroby. Jasným důkazem je dosažení kratšího výrobního času spoje a zpřesnění rozměrové stálosti spoje během procesu výroby. To bylo dosaženo díky použití několika jednoduchých tvářecích operací. Tím odpadají energeticky náročné operace (např. svařování nebo indukční předehřev lemového lepidla), které velkou mírou ovlivňují i výrobní náklady. [5]

Lemový spoj je tvořen spojením vnitřního plechového dílu a vnějšího plechového dílu. Spojení je vytvořeno na okraji vnitřního plechového dílu zalemovaným okrajem vnějšího plechového dílu. Podstata spočívá v tom, že vnitřní plechový díl obsahuje alespoň jeden dorazový výstupek, který je vytvořen v oblasti hranice lemu. Tento výstupek je vytvořen na horní ploše vnitřního plechového dílu. Při procesu lemování je část každého dorazového výstupku deformována lištou lemovky, nebo lemovací rolnou. Zbylá část dorazového výstupku zůstává zachována a tvoří doraz pro zalemovaný vnější plechový díl. Dorazový výstupek vytvořený na obvodu vnitřního plechového dílu je částečně deformován zalemovaným okrajem vnějšího plechového dílu. Nedeformovaná část dorazového výstupku, tvořící doraz pro hranu zalemovaného okraje vnějšího plechového dílu, a brání vzájemnému posunu vnitřního plechového dílu a vnějšího plechového dílu. Po obvodu vnitřního plechového dílu je umístěno v optimálním množství více dorazových výstupků (Obr. 5.18). Tím dochází po zalemování k úplnému zamezení vzájemného posunu vnitřního plechového dílu vůči vnějšímu plechovému dílu. Vzniklá soustava má 0 stupňů volnosti. [5]



Obr. 5.17 - Vytvoření zámkového výstupku [5]

Na obrázku 5.17 je názorně vyobrazeno vytvoření dorazu - zámku. V první fázi procesu je vytvořen dorazový výstupek na vnitřním plechovém dílu. V další fázi výrobního procesu je vnější plechový díl zalemován k vnitřnímu plechovému dílu tak aby byl výstupek zdeformován jen z části, tím vzniká doraz.



Obr. 5.18 - Umístění zámkových výstupků na bočních dveřích automobilu



Obr. 5.19 - Zalemované zámkové výstupky



Obr. 5.20 - Řez fixačním bodem lemového spoje

5.3 Analýza konvenčních metod fixace lemových spojů


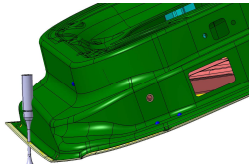

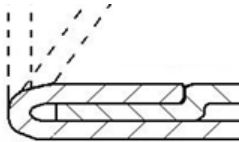
Doposud používané způsoby fixace lemů panelových dílů karoserie automobilu, především nejčastější technologie želatínace, fixace lemů svařováním/pájením a technologie zámkových výstupků, se vyznačují řadou výhod a nevýhod. Na základě jednotlivých vlastností se rozhoduje o aplikaci dané technologie na konkrétní díl, proto je možné nasazení více výše zmíněných technologií na jedné výrobní lince, kdy například pro fixaci lemů bočních dveří automobilu bude použita technologie zámkových výstupků, která se vyznačuje nízkými investičními a provozními náklady. Z důvodu, že dorazy vzniklé deformací vyraženého výstupku lokálně zamezují vzájemnému pohybu spojovaných dílů pouze v jednom směru, není technologie vhodná pro fixaci plošného rozměru motorových kapot a zadních vík.

U motorové kapoty či zadního víka kufru mohou být nasazeny technologie želatínace či fixace svařováním, které vynikají svou schopností dodatečného nastavení a následné stabilizace plošného tvaru. Právě hlavně díky této veliké výhodě, která ve výrobním procesu hraje zásadní roli, dochází i přes vysoké provozní náklady k jejich používání.

Takové řešení ovšem celkově negativně ovlivňuje celý výrobní proces, a to především vysokými investičními náklady do jednotlivých technologií výroby, vysokou energetickou náročností výrobního procesu a prodlužováním doby výroby, které má za následek nedodržení předepsaného výrobního taktu.

S ohledem na skutečnost, a jak vyplývá ze souhrnné rešerše jednotlivých metod fixace lemových spojů, vyplývá, že tato problematika je často řešena na lokální úrovni – jednotlivé automobilové společnosti si většinou jednotlivé metody vyvíjí sami interně a z toho důvodu je velice obtížné a téměř nemožné dohledat relevantní informace o aktuální využitelnosti jednotlivých metod ve světě. Většina těchto metod je publikována pouze formou patentů a z toho důvodu následná analýza výhod a nevýhod (Tabulka 2) zohledňuje pouze metody, které se historicky využívaly nebo stále využívají např. ve společnosti firma Škoda Auto a.s., a je možné se k nim relevantně vyjádřit.

Tab. 2 Výhody a nevýhody konvenčních metod fixace lemových spojů

Metoda	Výhody	Nevýhody
Želatinace	<ul style="list-style-type: none"> Možnost nastavení plošného rozměru dílu po zalemování Dostatečná fixace spojovaných dílů 	<ul style="list-style-type: none"> Konstrukční, energetická a prostorová náročnost Degradace lepidla Náklady Časová náročnost
MIG pájení 	<ul style="list-style-type: none"> Tvrdé pájení pozinkovaných ocelových dílů Stálost zinkové vrstvy spojovaného materiálů – stálost korozní ochrany 	<ul style="list-style-type: none"> Energeticky náročný proces Smáčivost – problém k ulpění pájky na požadovaném místě z důvodu měnící se jakosti základního materiálu
Odporové bodové svařování 	<ul style="list-style-type: none"> Schopnost stabilizace i plošného rozměru Pevná fixace lemu 	<ul style="list-style-type: none"> Problematické nastavení tlaku svařovacího zařízení vzhledem k zajištění auditové nezávadnosti – nutnost broušení povrchového dílu po zavaření Vysoké investiční náklady Vysoké náklady na údržbu a servis Možné narušení zinkového povlaku v místě svarového bodu Nestejná pevnost svarových bodů v závislosti na množství lepidla Energeticky náročný proces
VarioPicker 	<ul style="list-style-type: none"> Spolehlivost procesu Vysoká přesnost a reprodukovatelnost Žádné známky poškození vnějšího povrchu Eliminuje obvodové indukční zahřívání 	<ul style="list-style-type: none"> Vysoké náklady na zařízení Energetická náročnost Nutnost mnoha fixačních bodů po obvodu
Sperrbuckel 	<ul style="list-style-type: none"> Jednoduchý a krátký proces Nízké výrobní a pořizovací náklady Univerzálnost Nízká energetická náročnost Dobrá fixace Ekologická metoda 	<ul style="list-style-type: none"> Geometrie vnitřního plechu musí umožnit přístup pro razící jednotku Délka nepřelemované části dorazového výstupku je omezena šířkou jemného utěsnění

6 CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Z předchozí rešerše a přehledu současného stavu problematiky vyplývá, že přestože již nyní existuje více metod fixace lemového spoje, tak neexistuje univerzální způsob, který by v co možná nejvýše možné míře docílil kombinace všech výhod jednotlivých konvenčních technologií a zároveň došlo k eliminaci veškerých jejich nevýhod, za dodržení podmínek dostatečné kvality výrobku. Z toho důvodu si disertační práce klade následující hlavní cíl:

- Návrh nového typu spoje, resp. nové metody fixace lemového spoje korespondující se všemi požadavky hlavně z hlediska dostatečné rozměrové stability a ekonomičnosti provozu.

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

- Návrh konstrukčního řešení nového typu lemového spoje
- Ověření navrženého konstrukčního řešení lemového spoje
- Návrh využití SW a metodiky implementace numerických simulací pro nový typ lemového spoje
- Zhodnocení výsledků a přínosů nového typu lemového spoje

7 NÁVRH NOVÉHO ŘEŠENÍ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE

Na základě vlastností jednotlivých metod se rozhoduje o aplikaci dané metody na konkrétní díl, proto je možné nasazení více výše zmíněných metod na jednom modelovém typu automobilu, to má za následek prodlužování výrobních časů. Například pro fixaci lemů bočních dveří automobilu bude použita metoda zámkových výstupků, která se vyznačuje nízkými investičními a provozními náklady. Z důvodu, že dorazy vzniklé deformací vyraženého výstupku lokálně zamezují vzájemnému pohybu spojovaných dílů pouze v jednom směru, není tuto metodu vhodné aplikovat pro zajištění plošného rozměru na všechny díly karoserie automobilu. [P1, P2, P10]

Na druhou stranu u motorové kapoty či zadního víka kufru mohou být nasazeny metody „želatínace“ či fixace svařováním/pájením, které vynikají svou schopností dodatečného nastavení a následné stabilizace plošného tvaru spojovaných dílů. Právě hlavně díky této veliké výhodě, která ve výrobním procesu hraje zásadní roli, dochází i přes vysoké provozní náklady stále k jejich používání. Takovéto řešení ovšem nepříznivě ovlivňuje celý výrobní proces, a to především vysokými investičními náklady do jednotlivých metod výroby a jejího technologického zařízení, vysokou energetickou náročností výrobního procesu a prodlužováním doby výroby, které má za následek nedodržení předepsaného výrobního taktu. Proto je více než vhodné řešení tohoto problému, nalezení nového způsobu, jak dodržet rozměrovou stabilitu spojovaných dílů lemováním tak, aby se v co možná nejvyšší možné míře docílilo kombinace všech výhod jednotlivých konvenčních technologií a zároveň došlo k eliminaci veškerých jejich nevýhod. [P1, P2, P3, P10]

Z výše uvedeného tedy vyplývají základní kritéria pro stanovení nového řešení. Nové řešení by mělo eliminovat veškeré nevýhody stávajících metod.

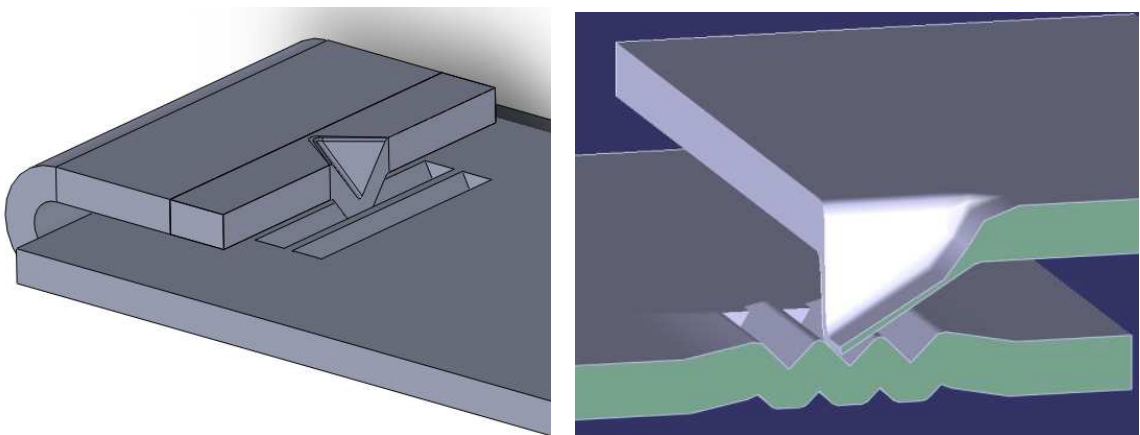
7.1 Požadavky na nový způsob fixace lemového spoje

Následující požadavky je nutné splnit při návrhu a realizaci nového řešení: [P7, P8, P10]

- **Způsob fixace musí být energeticky nenáročný**
- **Nesmí ovlivňovat vzhled povrchového plechu – kvalitativní - auditové požadavky**
- **Náklady na technologické zařízení by měly být co nejnižší**
- **Možnost nenáročné implementace do stávajících výrobních linek**
- **Univerzálnost aplikace na různé díly**
- **Zajištění dobré rozměrové stability dílu během výrobního procesu**
- **Zajištění dostatečné pevnosti spoje**

7.2 Drážková fixace lemového spoje

Návrh nového typu spoje vychází ze zkušeností s metodou „zámkových výstupků“, kterou se autor disertační práce detailněji zabýval v rámci výzkumu během zpracování bakalářské a diplomové práce. Tato metoda dokáže efektivně zamezit pohybu vnitřního dílu vůči vnějšímu pouze v jednom směru a proto je nutné jednotlivé fixační elementy umístit vždy pouze naproti sobě po celém obvodu dílu. Nicméně v případě tvarově složitějších a rozměrnějších dílů, může stále docházet k rozevírání lemového spoje. Na základě těchto zkušeností bylo potřeba nalézt takové řešení, které toto negativum eliminuje a z toho důvodu vznikla hypotéza nového typu spoje, který bude schopen uzamknout pohyb vnitřního dílu v obou směrech. Hypotéza nového řešení se zakládá na zamezení pohybu vnitřního dílu vůči vnějšímu v obou směrech na základě mechanického uzamčení. Navrhované řešení (viz obrázky níže – 7.1) předpokládá vytvoření drážek po obvodu vnitřního plechového dílu pomocí speciálního razníku s matricí. Na stojině lemu vnějšího plechového dílu jsou vytvořeny speciální výstupky – háčky, které po zalemování zapadnou do jedné z drážek, a následnou plastickou deformací bude přesně kopírovat tvar drážky, která je deformačně zpevněná, tudíž se více nedeformuje a vznikne pevný spoj s mechanickým uzamčením a to vede právě k fixaci vzájemné polohy spojovaných dílů v průběhu lemování a následného výrobního procesu. [P8, P9, P10]



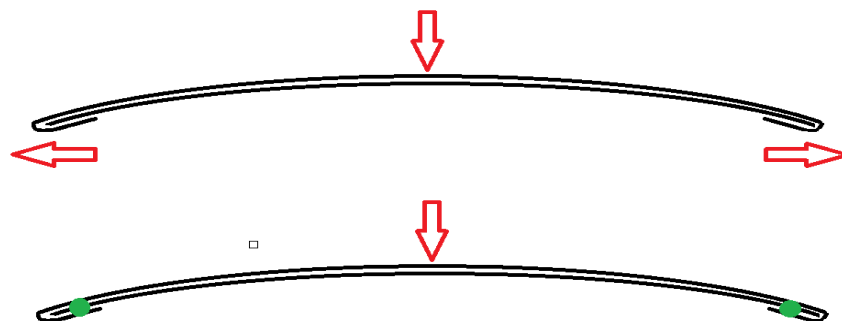
Obr. 7.1 - Princip mechanického zámku [P9]

Více drážek na vnitřním plechu má své opodstatnění. Reálná výroba panelových dílů je komplexní záležitost a proto se musí počítat s některými ovlivňujícími jevy, které mohou daný proces výroby komplikovat. Lemování je ve své podstatě založeno na ohybu vnějšího plechového dílu přes díl vnitřní, tudíž je nutné uvažovat s limitujícími kritérii pro ohyb plechu, jako jsou minimální poloměr ohybu a tloušťka materiálu. Z těchto důvodů je mezi vnitřním a vnějším dílem určitá mezera tak, aby lemování proběhlo bez větších problémů a nepříznivé

deformace materiálu. V důsledku nutné mezery mezi sestavenými plechy ovšem může nastat tolerovaný, nepatrný pohyb vnitřního plechu vůči vnějšímu. Drážky jsou proto navrženy tak, aby při situaci kdy tento jev tolerovaného pohybu nastane, vždy docházelo k mechanické fixaci obou dílů k sobě. S ohledem na požadavek dodržení auditové nezávadnosti vnějšího povrchu panelového dílu v oblasti lemového spoje je nutné se zaměřit i na tuto dílčí problematiku. Právě předem vytvořený drážkový profil na vnitřním díle by měl mít takovou geometrii, aby v důsledku kroku dolemování nedocházelo k přenosu vysokých lokálních tlaků, které by mohly způsobit geometrické nepřesnosti na vnějším díle. To vše bylo nutné zohlednit v návrhu proveditelnosti. [P9]

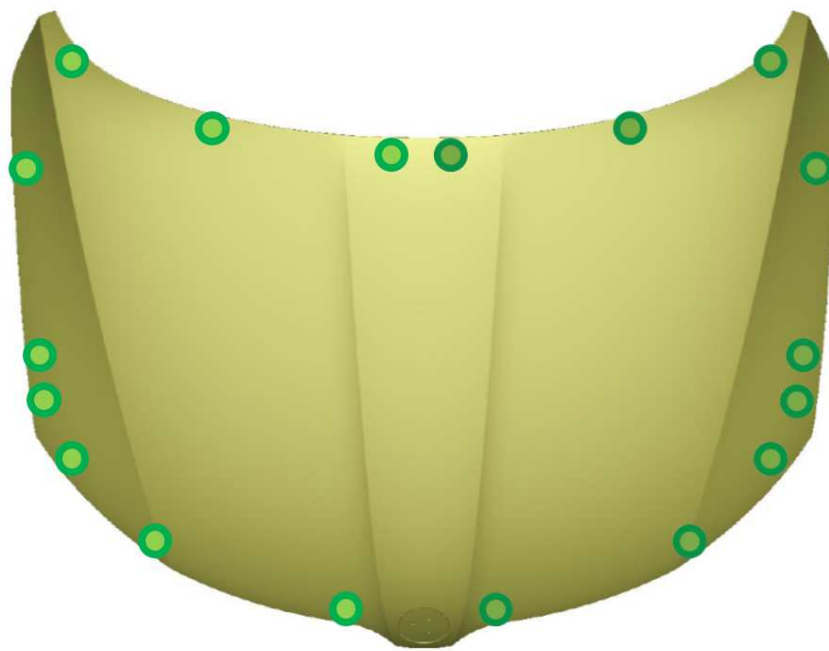
7.3 Návrh proveditelnosti

Pro experiment fixace lemového spoje byla zvolena přední kapota modelu SK351. Tento panelový díl svou velikostí a vlastnostmi vhodně slouží k navození podmínek, které mohou nastat u všech obdobných dílů, kde je potřeba využít fixaci lemu. Přední kapota je tak rozsáhlý panelový díl, že samotná vlastní tíha dílu ovlivňuje stabilitu lemového spoje. Když je díl umístěn vodorovně, vypouklá kapota má tendenci se uprostřed propadat, to způsobuje nepatrné rozevírání samotného tvaru a vnitřní plechový díl má snahu se vysunovat ze samotného lemu (Obr. 7.2). [P9]



Obr. 7.2 - Ovlivnění stability lemového spoje vlastní tíhou bez použití fixace (nahore) a s fixací (dole)

Nejprve bylo nutné určit počet potřebných fixačních bodů. Z hlediska předpokládané pevnosti, udržitelnosti jednoho bodu a dále s ohledem na navazující výrobní metody, jako je lakování a nanášení jemného utěsnění lemu po kataforetickém lakování (dále jen KTL procesu), bylo zvoleno celkem 12 fixačních bodů po obvodu celého dílu (viz obr. 7.3). [P9]



Obr. 7.3 - Příklad pozic fixačních bodů [P10]

7.3.1 Materiál přední kapoty

Jako experimentální materiály, byly zvoleny ocelové plechy DX54D a HX180BD definované podle EN 10346:2009, které jsou nejčastěji využívanými materiály pro panelové díly ve firmě Škoda Auto.

Tab. 3 Vnitřní plech kapoty:

DX54D + Z100 MBO tl. 0,65 mm

Třída oceli		Typ nátěru	Chemické složení hm. %					
Název oceli	Označení		C	Si	Mn	P	S	Ti
DX54D	1.0306	+Z	0,12	0,5	0,6	0,1	0,045	0,3

D – určeno k pokovení/lakování ponorem

Mechanické vlastnosti

	R_e [MPa]	R_m [MPa]	A₈₀ [%]	r₉₀	n₉₀
DX54D + Z	120-220	260-350	36	1,6	0,18

Povrchová úprava

Označení povlaku	Minimální tloušťka nátěru, oba povrchy		Teoretická tloušťka povrchové vrstvy v jednoduché kapkové zkoušce		Hustota [g/cm ³]
	Triple spot test	Single spot test	Typická hodnota	Rozmezí	
Z100	100	85	7	5 - 12	7,1

M – malý zinkový květ

B – povrch zlepšené jakosti

O – olejování povrchu

Tab. 4 Vnější plech kapoty:

HX180BD + Z100 MCO tl. 0,65mm

Třída oceli		Typ nátěru	Chemické složení hm. %							
Název oceli	Označení		C	Si	Mn	P	S	Al	Nb	Ti
HX180B D	1.0914	+Z	0,1	0,5	0,7	0,06	0,025	≤0,1	0,09	0,12

H – vysoko pevnostní ocel, pro tváření za studena

X – válcováno (za tepla nebo za studena), není specifikováno

180 – minimální R_{p0,2} [MPa]

B – BH ocel

D – určeno k pokovení/lakování ponorem

Mechanické vlastnosti

	R_{p0,2} [MPa]	BH2	R_m [MPa]	A₈₀ [%]	r₉₀	n₉₀
HX180BD	180-240	35	290-360	34	1,5	0,16

Povrchová úprava

Označení povlaku	Minimální tloušťka nátěru, oba povrchy		Teoretická tloušťka povrchové vrstvy v jednoduché kapkové zkoušce		Hustota [g/cm ³]
	Triple spot test	Single spot test	Typická hodnota	Rozmezí	
Z100	100	85	7	5 - 12	7,1

M – potlačený květ

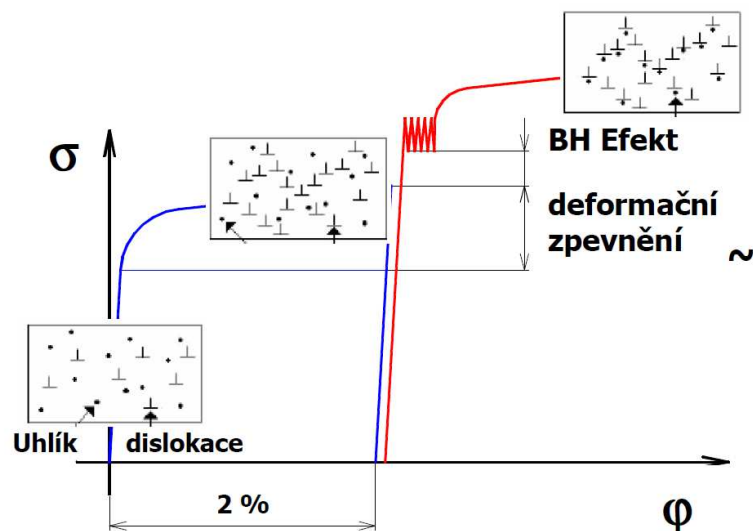
C – povrch nejlepší jakosti

O – olejování povrchu

BH oceli (Bake Hardening)

Materiál HX180BD pro vnější díl se řadí do kategorie BH ocelí. Jsou to oceli zpevněné speciálním výrobním procesem. BH oceli mají základní feritickou strukturu. Před lisováním mají nízkou hodnotu meze kluzu a vysoké parametry plasticity. Během vypalování laku dochází k deformačně-tepelnému stárnutí a nárůstu meze kluzu o 30-70 MPa. Díly karoserie vyrobené z BH ocelí mají poté dovolené vyšší maximální zatížení a vyšší odolnost vůči škrábancům, rýhám a otlacení. [20]

Efekt BH zpevnění (Obr. 7.4) je možné obecně dosáhnout pomocí difuze volných atomů intersticiálních prvků, tj. dusíku a uhlíku. Difuze atomů dusíku ve feritu při teplotách okolí, je poměrně vysoká z čehož vyplývá možnost rychlého a neřízeného stárnutí oceli. Pro snížení vlivu neřízeného stárnutí oceli a též zpevnění tuhého roztoku dusíkem se přidává hliník (Al) vázající dusík na AlN, čímž se značně sníží jeho nepříznivý vliv. Další snížení volného dusíku se dosahuje přidáním bóru do oceli, který vytváří stabilní BN. Nízké rozpustnosti dusíku v oceli je možné dosáhnout snížením teploty ohřevu materiálu v procesech tváření za tepla. Vzhledem k uvedeným nepříznivým vlivům je snahou obsah dusíku v oceli minimalizovat. Difuze atomů uhlíku ve feritu při pokojových teplotách je v porovnání s dusíkem značně nižší, což umožňuje ovládat proces stárnutí pomocí termické aktivace atomů uhlíku rozpuštěných v deformovaném feritu. Za nejvhodnější se považuje obsah volného uhlíku 0,004 % a optimální podmínky umělého stárnutí $T = 170^{\circ} \text{C}$ a $t = 20 \text{ min}$. [21]



Obr. 7.4 - Princip BH efektu [18]

Zpevnění ocelí je docilováno po zpracování, resp. kontrolovaném procesu žíhání. Zhruba 10 % daného typu ocelí je využíváno na výrobu karoserií. Technologie BH ocelí je v podstatě proces nízkoteplotního staticko-napěťového stárnutí, který zahrnuje interakci mezi rozpuštěnými uhlíkovými atomy a dislokacemi generovanými během tváření. Stárnutí automobilových komponent probíhá při teplotě okolo 170°C. Dochází ke zvyšování úrovně meze kluzu vlivem dvou odlišných zpevňovacích procesů, a to: [22]

- vlivem stádia vzniku Cottrelvy atmosféry na dislokacích
- vlivem precipitace karbidů díky existenci Cottrelvy karbidické atmosféry

Stádium zpevnění závisí na množství rozpuštěného uhlíku drženého v matici původní oceli. U nízkouhlíkových ocelí proces velmi zřídka přechází z prvního stádia a) do druhého b). Maximální nárůst meze kluzu vlivem Cottrelvy atmosféry se pohybuje u nízkouhlíkových ocelí okolo 30 MPa za předpokladu 1 až 2 ppm rozpuštěného uhlíku v matici. Uvedený nárůst meze kluzu je nízký, a proto je nutno realizovat kroky pro další přírůstek BH zpevnění. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby: [22]

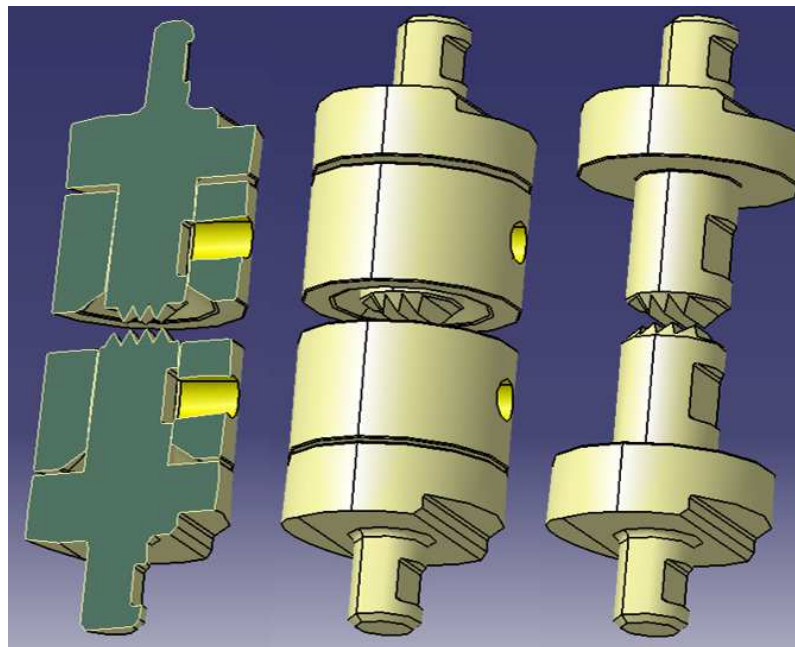
- zvětšením velikosti zrna během kontinuálního žíhání
- zvýšením rychlosti ochlazování okamžitě po realizaci kontinuálního žíhání.

Různá velikost zrn ovlivňuje distribuci uhlíku mezi vnitřní částí zrna a jeho hranicí vlivem měnícího se počtu segregačních míst na hranicích zrn. S rostoucí velikostí zrn se snižuje plocha hranic zrn a celkové množství uhlíku, které může být koncentrováno na hranicích zrn,

se takto snižuje, ve srovnání s matricí s jemnozrnnou strukturou. To má za následek nárůst zvýšení rozpuštěného uhlíku v matrici (uvnitř zrn). Zvýšením rychlosti ochlazování ze žhací teploty se zabrání difúzi uhlíkových atomů na hranice zrn a tím se udrží zvýšená saturace uhlíku v kovové matrici. [3, 22, 23,]

7.3.2 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek do vnitřního plechu

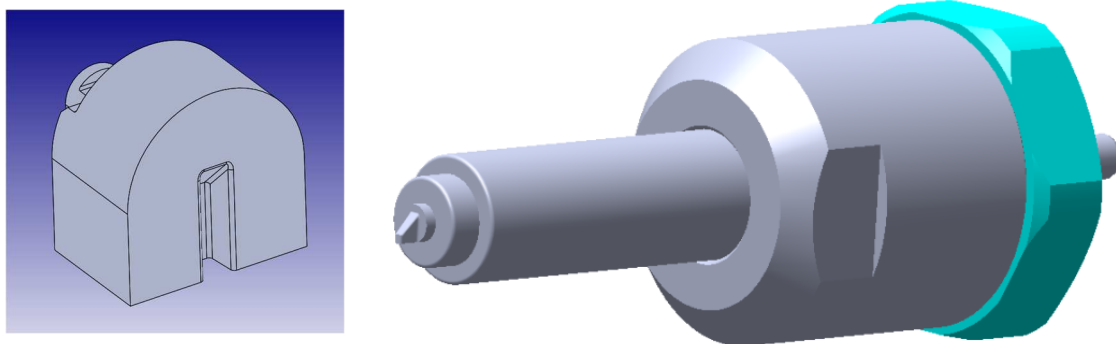
Na základě znalostí z teorie tváření kovů, byla provedena konstrukce razníku, který předpokládá vytvoření drážkového profilu pro první navrženou variantu řešení fixace lemového spoje. Požadovaný drážkový profil se skládá ze třech hlavních drážek. Nástroj je konstruovaný tak, že je možné výškově měnit dosedací rovné plochy razníku i matrice, to v reálném výsledku umožňuje nastavení různé výšky drážek pro ražení (Obr. 7.5) a dosáhnout různého profilu drážkování. [P9, P10]



Obr. 7.5 - Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek [P9, P10]

7.3.3 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků do stojiny na vnějším plechu

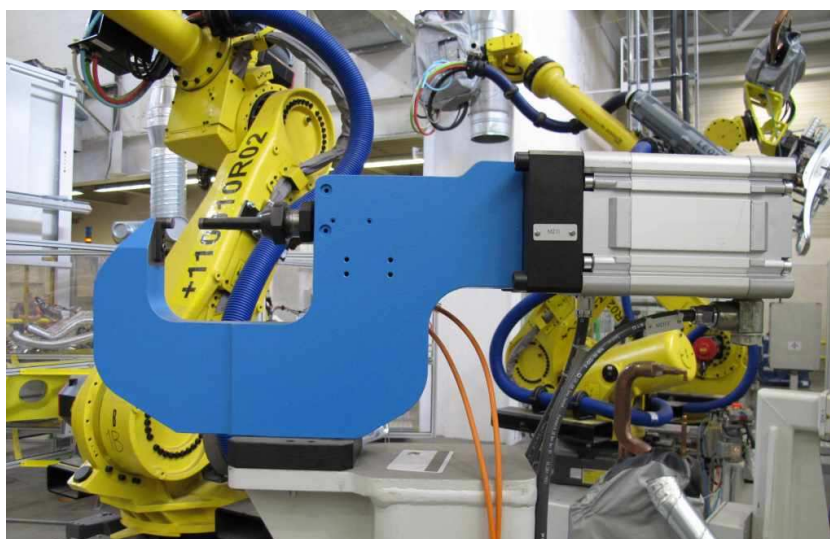
Pro vytvoření háčků do stojiny na vnějším plechu byl vytvořen návrh konstrukce razníku s matricí. U konstrukce je implementován integrovaný přídržovač stojiny plechu na základě pružinového mechanismu. Přídržovač zde plní funkci ke stabilizaci plechu ve vytipované poloze pro vytvoření háčku. Bez využití přídržovače by vytvoření háčku nebylo možné, samotná geometrie zkosení razníku by volný plech odsunula mimo matrici, a tudíž by nemohlo dojít k vytvoření požadované geometrie. [P9, P10]



Obr. 7.6 - Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků [P9, P10]

7.3.4 Určení vhodného stroje pro zhotovení drážek a háčků

Jako nejvhodnější se jeví využít pneumatické kleště pro realizaci ražení navržených prostředků pro fixaci lemových spojů. Pneumatické kleště (Obr. 7.7) od firmy Eckold (Tab. 5) umožňují snadnou a rychlou výměnu nástrojů. Pneumatické kleště lze ovládat jak ručně, tak je lze implementovat i do automatizovaného procesu. Ruční ovládání nevyžaduje žádné speciální zaškolení, obsluha je velice jednoduchá. [P9, P10]



Obr. 7.7 - Pneumatické kleště Eckold pro nástroje [P9]

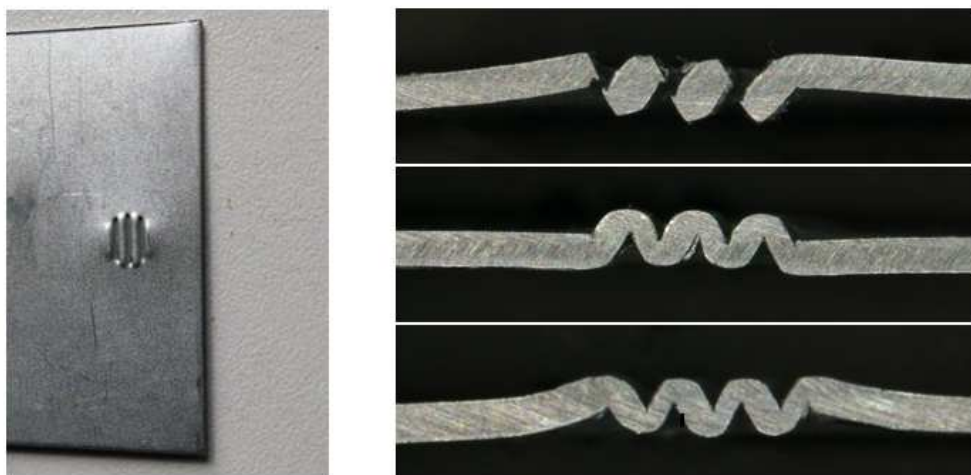
Tab. 5 Specifikace pneumatických kleští Eckold

Výrobce	Eckold
Válec s pístnicí	Festo
Zdvih	30 mm
Tlak	Max. 12 Bar

7.4 Ověření funkčnosti navržených nástrojů pro mechanickou fixaci lemových spojů

Na základě konstrukčních modelů nástrojů pro vyhotovení funkčních prvků fixace lemového spoje byly vyrobeny nástroje. Správnost jejich funkce byla ověřena na sadě experimentálních vzorků z BH oceli.

Níže jsou zobrazeny obrázky reálného drážkování na vzorku a metalografické výbrusy drážkového profilu. Obrázky demonstrují, jak změna nastavení výšky dosedacích ploch razníku a matrice může ovlivnit výsledný profil drážek. Vhodným nastavením razníku lze dosáhnout požadovaného výsledku, kdy jako nejvhodnější řešení se jeví nastavení z Obr. 7.8 vpravo dole, kde je samotný profil drážkování mírně vytažen nad spodní rovinu plechu. Díky tomu profil drážkování získá i mírně pružící schopnosti a hypoteticky by se měl tedy zároveň chovat i jako „tlumič“ při kroku dolemování. Toto chování by mělo přispět k auditové nezávadnosti povrchového - vnějšího dílu. [P9]



Obr. 7.8 - Drážky na vnitřním plechu (vlevo), změna profilu drážek nastavením dosedacích ploch razníku (vpravo) [P9]

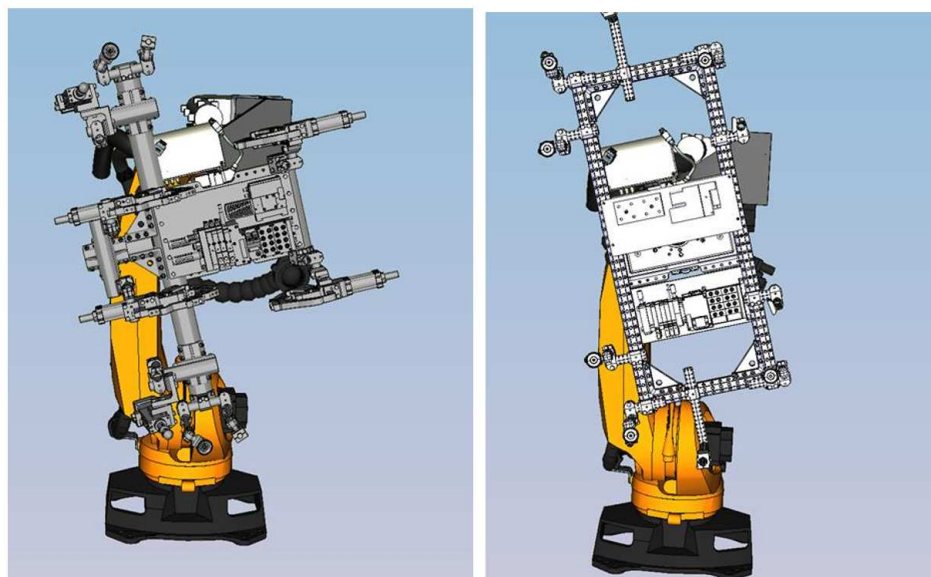
Obdobně byla ověřena funkčnost druhého nástroje, který má za úkol výrobu speciálních háčků na okraji samotného plechu. Na následujících obrázcích (Obr. 7.9) je znázorněn reálný výsledek.



Obr. 7.9 - Háček na stojně vnějšího plechu připraveného pro lemování [P9]

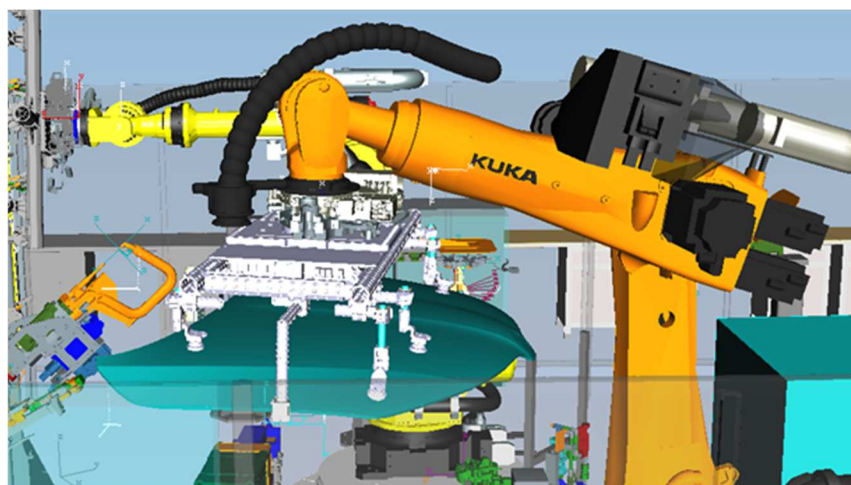
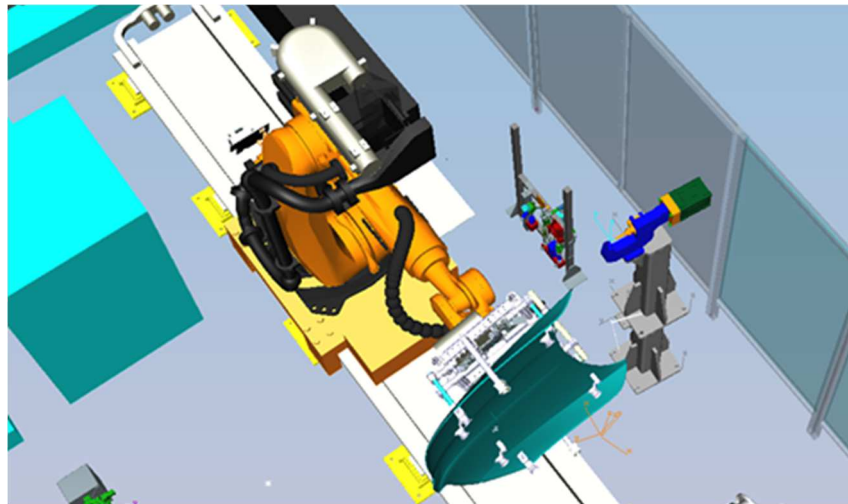
7.5 Pracoviště fixace lemových spojů

K ověření funkčnosti navrženého řešení bylo využito robotické pracoviště. V robotickém pracovišti jsou staticky umístěny pneumatické kleště s výměnnými nástroji. Za pomoci robota a speciálních přípravků pro uchopení jednotlivých plechů probíhá manipulace s jednotlivými díly do správných poloh pro vyhotovení drážek a háčků pneumatickými kleštěmi. Na Obr. č. 7.10 a je možné vidět robota s přípravkem pro správné uchopení vnitřního dílu kapoty (vlevo) a robota s přípravkem pro uchopení vnějšího dílu kapoty (vpravo). [P10]



Obr. 7.10 - Přípravky pro upnutí a manipulaci s plechy: pro vnitřní díl kapoty (vlevo) a pro vnější díl kapoty (vpravo) [P10]

Jelikož je využíváno stávající zkušební robotické pracoviště bylo zapotřebí předem provést simulaci najížděcích drah robota v softwaru „Process Simulate“ a podle dostupnosti robotického ramena s přípravkem nalézt vhodné umístění pneumatických kleští tak, aby bylo možné dosáhnout všech poloh pro vytipované body fixace lemu. Následující obrázky (Obr. 7.11) jsou vybrány právě ze simulace najíždění vnějšího dílu kapoty k pneumatickým kleštím pro vyhotovení požadovaných háčků. [P9]



Obr. 7.11 - Simulace drah robota s upínacími přípravkem a vnějším dílem kapoty na pozice fixačních bodů [P9]

Na základě úspěšné simulace, přípravy programů pro robotické rameno a instalaci pneumatických kleští ve zkušební robotické lince, v oddělení nářařovny společnosti Škoda Auto a.s., je možné tento program spustit přímo na reálném pracovišti a ověřit správnost programů na vyhotovení funkčních prvků drážkové fixace lemového spoje. Robotické pracoviště disponuje 2 robotickými rameny od firmy Kuka s pojezdem a dále je navrženo tak, aby tam bylo možné upevnit různé upínací přípravky a strojní příslušenství dle potřeby. V případě nutnosti je možné provést malé korekce drah ručním programováním přímo na

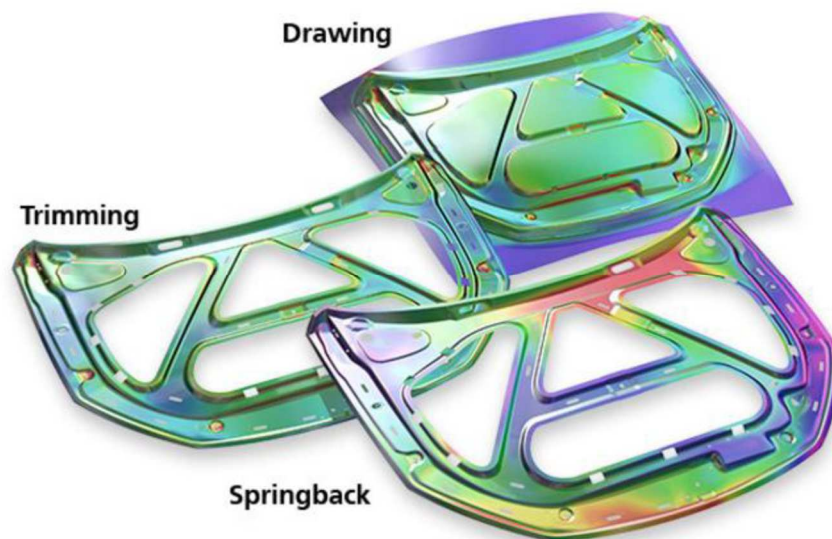
pracovišti. Po vytvoření funkčních prvků přichází samotná fáze lemování a k vyhotovení kompletního dílu přední kapoty v konvenčním lemovacím stroji. Po zalemování a následné vizuální kontrole dílu, jestli háčky správně zapadají do drážek, se následně díl přesouvá k důslednější kontrole pomocí souřadnicového měřicího stroje. Kontrola se opakuje znovu po kataforetickém lakování a na základě porovnání rozměrových výsledků je určeno, zda je spoj stabilní, či nikoliv. [P9, P10]

8 METODIKA NUMERICKÝCH SIMULACÍ DRÁŽKOVÉ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE

8.1 Úvod do numerických simulací

Dříve se v případě základních procesů v oblasti tváření používaly osvědčené postupy na základě zkušeností z praxe. V případě metod, kde se využívaly empirické výpočty, jejich výsledky se často odlišovaly, tím pádem mohly poskytnout pouze hrubý náhled k dané technologii. Často šlo jen o předběžné návrhy pomocí postupného dosazování tabulkových hodnot do empirických vztahů.

V současné době se k výpočtu technologických procesů standardně využívají numerické simulace. Na základě vstupních, okrajových podmínek dávají uživateli možnost přímo a přesně sledovat navržený výrobní proces ještě ve fázi engineeringu, tedy předvýrobní etapě výrobního procesu. U procesů plošného tváření je možné pomocí numerických simulací sledovat chování vstupního polotovaru během výrobního procesu, to lze například pro operace hlubokého tažení, stříhání, kalibrování, ohýbání. Dále lze v dnešní době pomocí moderních simulačních softwarů sledovat průběh dalších dodatečných výrobních metod, jako je například lemování, vytváření sestav apod. [24] K vyhodnocení procesu je možné využít řadu analýz, např. průběh napětí, zpevnění materiálu, ztenčení plechu, odpružení materiálu a mnoho dalších (viz Obr. 8.1).“ [25]



Obr. 8.1 – Příklad dílů z numerické simulace lisovacího procesu vnitřní kapoty automobilu [25]

Pokud z nějakého důvodu výsledek simulace neodpovídá některým z požadavků na navržený díl, tak lze vstupní parametry změnit a upravit výrobní proces, a to vše v předvýrobní

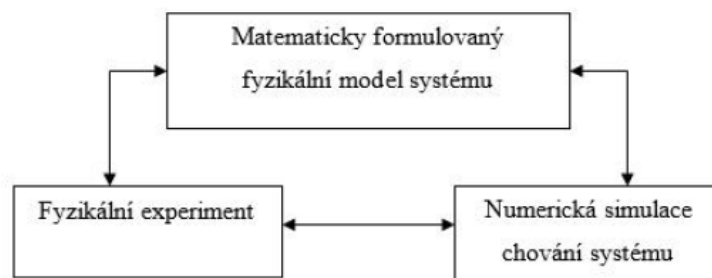
etapě bez dodatečných zásahů do nástrojů, kdy se pomocí postupných optimalizačních smyček získá výsledek v požadované kvalitě. [28] „Numerické simulace i přes své výhody s sebou nesou také řadu nevýhod. Jednou z nich je pořizovací a udržovací cena licencí, která je pro řadu menších podniků rozhodující.“ [25]

Nejčastěji se jako základní modul numerické simulace využívá metoda konečných prvků (dále jen MKP). Jedna z nejčastěji používaných metod výpočtu je metoda řešení diferenciálních rovnic rovnováhy s použitím podmínek plasticity. Dalšími méně používanými moduly jsou např. metoda sítí, Ritzova metoda, Galerkinova metoda, metoda konečných objemů, aj. Počítačová simulace představuje výrazné usnadnění a zkvalitnění předvýrobních etap, avšak oproti dřívějším výpočetním metodám se jedná o podstatně složitější proces výpočtu. Numerické simulace pracují se známými fyzikálními zákony, jako jsou klasické teorie pružnosti a pevnosti, plasticity, teorie z oblasti přenosu tepla a materiálových věd. [24-26]

8.2 Metoda konečných prvků

Metoda konečných prvků (z anglického FEM – „finite element method“) byla vyvinuta v 50. letech minulého století. Obecně se tato metoda používá k řešení rozsáhlých inženýrských problémů. Z počátku byla používána v letectví, kosmonautice a lodním průmyslu, až později se její využití přesunulo např. i do strojírenského průmyslu.

V dnešní době lze tuto metodu využívat v podstatě na kterémkoli výkonnějším PC. „Schéma na Obr. 8.2 objasňuje souvislost mezi fyzikálním a matematickým modelováním fyzického experimentu s využitím numerické simulace.“ [25]

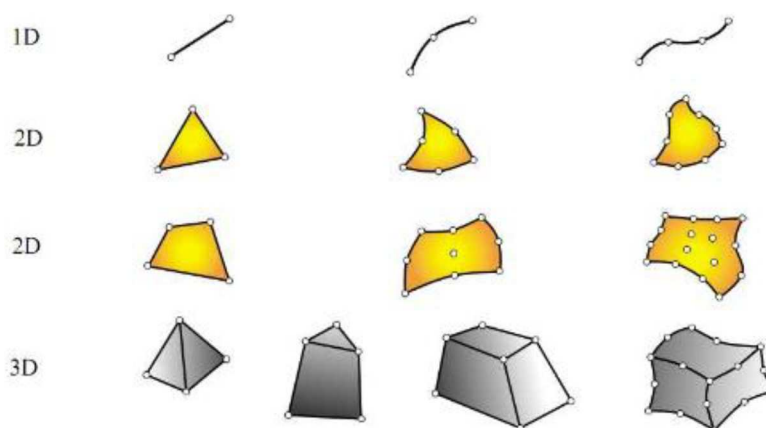


Obr. 8.2 – Souvislosti fyzikálního a matematického modelování s fyzikálním experimentem [26]

Základním principem MKP je rozdělení dané součásti na konečný počet podoblastí-elementů a vytvořit tzv. konečno prvkovou síť. Pro každý typ MKP elementu je kromě dimenze a tvaru charakteristický počet a poloha jeho uzlů. Uzly sítě jsou body, v nichž jsou hledány neznámé parametry řešení (např. posuvy a natočení, ze kterých se dále počítá napětí atd.).

Nejčastěji používané elementy, které se využívají pro výpočet, jsou ukázány na obr. 8.3. Místa spojení elementů, tzv. uzly, s sebou nesou informaci o souřadnicích uzlu. Souřadnice uzlů představují tvar a polohu elementu. Typy elementů lze rozdělit podle konkrétní aplikace a použitého zatížení: [25]

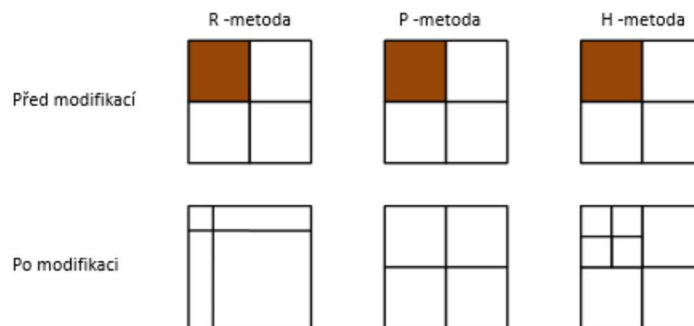
- **Liniové elementy** – elementem je úsečka, používá se u problematiky tyčí a nosníků
- **Plošné elementy** – elementem je skořepina nebo membrána, využívá se v problematice plošného tváření plechu s malou tloušťkou
- **Objemové prvky** – elementem je prostorový prvek, využití pro např. objemové tváření, nebo plošné tváření plechů větších tlouštěk



Obr. 8.3 – Příklady nejčastěji používanějších typů elementů pro řešení různých problémů [27]

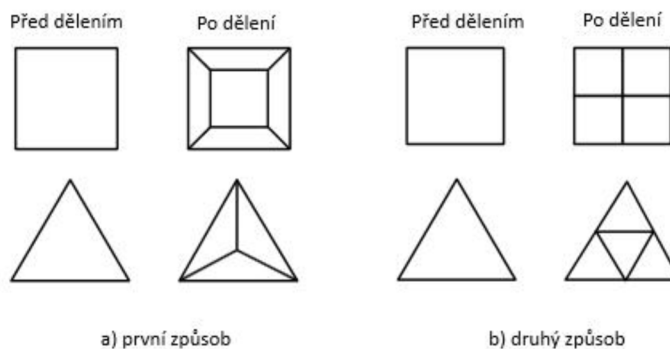
8.2.1 Popis použití MKP v numerických simulacích

Naprostá většina numerických simulací je založena na výpočtu, kde se využívá tzv. adaptivní síť. „Adaptivní síť je založena na automatické modifikaci výpočetní sítě v průběhu výpočtu. Jedná se o automatickou analýzu prvotních výsledků s následnou modifikací sítě. Lze se setkat s několika metodami, které vedou ke zpřesnění výpočtu, kterými jsou R – metoda, P – metoda a H – metoda. Nejpoužívanější metodou, je **H – metoda**, která je spolu s ostatními metodami zobrazena na Obr. 8.4.“ [25]



Obr. 8.4 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [27]

H – metoda spočívá v navyšování počtu prvků a uzlů při zachování stejného typu prvků. Při každé modifikaci počtu uzlů dochází k charakteristickému zmenšení rozměru prvků. Pokud jsou následně splněny potřebné podmínky konvergence, výsledky konvergují k přesnějšímu řešení. K modifikaci sítě dochází změnou velikosti elementu a to jak globálně, tak lokálně. Např. při tažení plechu dojde k automatické modifikaci sítě v oblasti brzdících drážek, rádiusů, ostrých hran, apod. H – metodu modifikace sítě je možné dále dělit na metodu, která nezachovává původní tvar elementu (a) a na metodu, která zachovává původní tvar elementu (b), viz Obr. 8.5. V oblastech, kde je během výpočtu nutné podrobněji popsat napěťo – deformační stav je nutné provést lokální modifikaci sítě. [25]



Obr. 8.5 – Rozdělení H-metody [27]

Samotný výpočet numerické simulace je ve většině případů založen na teorii implicitního řešení. Integrace implicitního řešení je založena na statické rovnováze, dynamické síly jsou tedy ignorovány. Následující rovnice jsou ve výpočtu řešeny po diskretizaci sítě. [27]

$${}^{t+\Delta t}R - {}^{t+\Delta t}P = 0 \quad (1)$$

$$R(\hat{u}) - P(\hat{u}) + K(\hat{u}) \cdot \Delta(\hat{u}) \quad (2)$$

Kde: R - vnitřní síly; P - vnější síly; Statické vyrovnaní je nutné řešit v čase $t+\Delta t$.

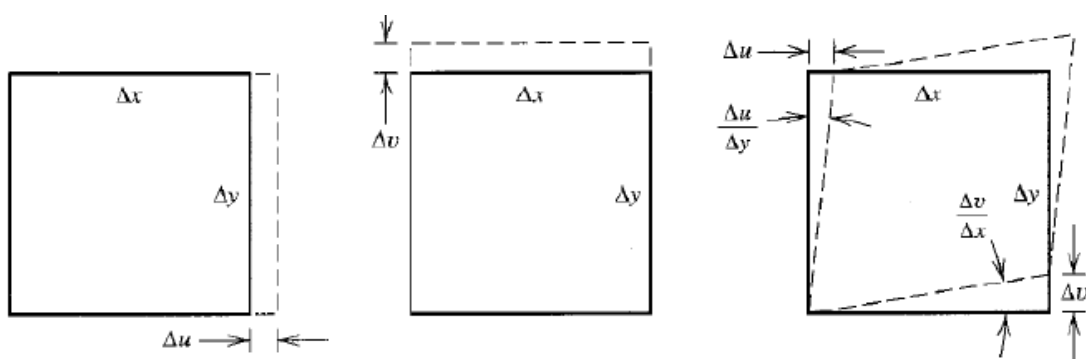
8.2.2 Možnosti ve výběru výpočtového elementu

K řešení fyzického problému v numerické simulaci je možné využít různé typy elementů, s kterými souvisí také samotný výpočet, jeho přesnost a opakovatelnost. V oblasti plošného tváření se lze setkat nejčastěji s elementy typu MEMBRANE, SHELL nebo SOLID. Dále se lze setkat s upravenými typy těchto elementů, jejichž použitelnost nebyla stále ověřena a z toho důvodu jsou k výpočtu využívány méně.

MEMBRANE – napětí v membránovém elementu je vztaženo k posunu podle následujících diferenciálních rovnic: [34]

$$\varepsilon_x = \frac{\Delta u}{\Delta x} = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \varepsilon_y = \frac{\Delta v}{\Delta y} = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \gamma_{xy} = \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y} = \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \quad (3)$$

Kde: Δx , Δy – rozměry elementu; Δu , Δv – *prodloužení v daném směru*; ε_i – deformace v daném směru, γ_{xy} – smyková složka deformace,



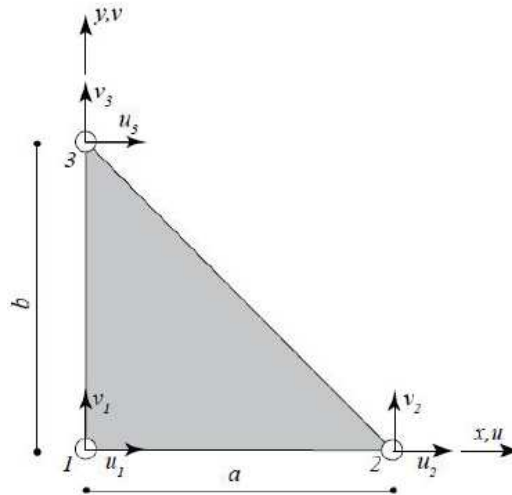
Obr. 8.6 – Grafické vysvětlení posunu v závislosti na napětí v membránovém elementu [34]

Pro výpočet lze využít trojúhelníkové či čtvercové elementy (tak, jak je zobrazeno na Obr. 8.6) a to buď s elementy s jednoduchým popisem (tří či čtyř uzlové elementy) nebo s podrobným popisem (šesti či devíti uzlové elementy). Např. program AutoForm využívá tři

uzlový trojúhelníkový membránový element, který má 2 stupně volnosti v každém uzlu. Každý element má tedy 6 uzlových neznámých (popis pomocí obr. 8.7 a rovnice 4). [28]

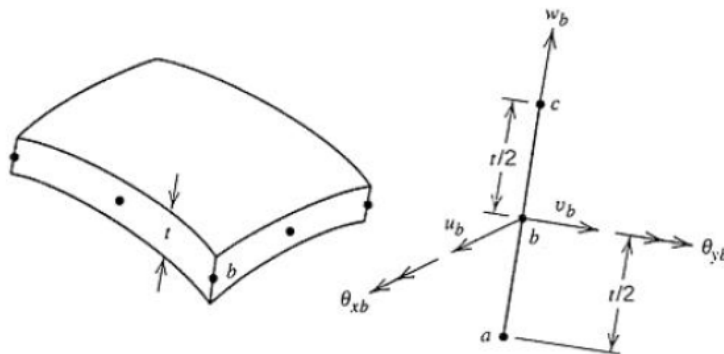
$$u(x, y) = \beta_1 + \beta_2 \cdot x + \beta_3 \cdot y$$

$$v(x, y) = \beta_4 + \beta_5 \cdot x + \beta_6 \cdot y \quad (4)$$



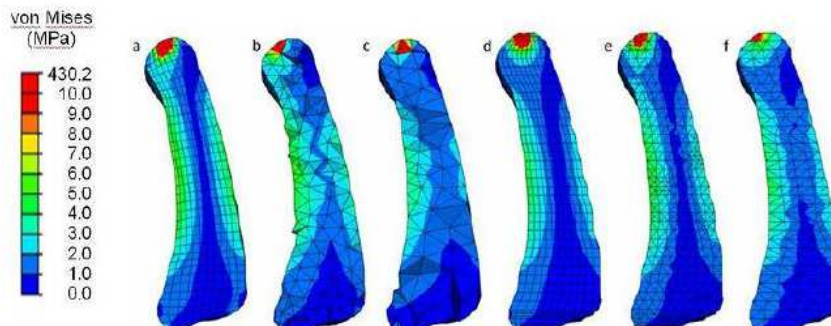
Obr. 8.7 – 3-uzlový trojúhelníkový membránový element [28]

SHELL – geometrie skořepinového elementu je definována její tloušťkou a střední plochou. Uzlový bod skořepinového elementu má 5 stupňů volnosti (3 translační směrem ke 2 tangentním a k normálovému vektoru, 2 rotační s tangentními vektory jako osami rotace). Nejběžnějším způsobem, jak získat skořepinový element, je kombinací membránového (membrane element) a ohybového elementu (bending element). Takto lze jednoduše dosáhnout quadrilaterálního elementu (Q4), který je znázorněn na Obr. 8.8. [28]



Obr. 8.8 – Shell element – zakřivený [28]

SOLID – jedná se o 3D elementy, které jsou neomezené co do možnosti tvaru, zatížení, materiálových vlastností a hraničních parametrů. Důsledkem této neomezenosti je, že musí být počítáno se všemi 6 napětími (tři normálové a tři tangenciální). Typickými 3D elementy konečnoprvkové sítě jsou např. tetrahedra či hexahedra elementy (Obr. 8.9).



Obr. 8.9 - 3D elementy konečnoprvkové sítě – rozdíl mezi tetrahedra a hexahedra elementem, jednotlivé výstupy a až f reprezentují různou výšku úvratě kovádel [28]

I přes to, že 3D Solid elementy mohou být využity v prakticky každé oblasti s velmi vysokou přesností výsledků, jejich využití není vždy tak jednoduché. 3D Solid elementy jsou nejsložitější a velmi zdlouhavé na přípravu a na kontrolu chyb sítě a hlavně nejvíce náročné z pohledu HW nároků a výpočetních časů. [25]

Rovnice (6) a (7) popisují řešení problému pomocí deformace. Pokud se všechny rovnice sloučí do jedné skupiny jako vektor, lze řešení problému zapsat jako:

$$\{\varepsilon\} = \{B\} \cdot \{U\} \quad (5)$$

$$\varepsilon_x = \frac{\delta u}{\delta x} \quad \varepsilon_y = \frac{\delta v}{\delta y} \quad \varepsilon_z = \frac{\delta w}{\delta z} \quad (6)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\delta u}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta x} \quad \gamma_{yz} = \frac{\delta v}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta y} \quad \gamma_{xz} = \frac{\delta u}{\delta z} + \frac{\delta w}{\delta x} \quad (7)$$

Většina 3D elementů jsou přímými rozšířeními plošných elementů. Rozšíření se skládá z přidání dalšího bodu v prostoru. Chování, ale také omezení specifických 3D elementů koreluje s 2D elementy, z kterých byly rozšířeny. [25]

Obecně lze pro matematické řešení úloh použít analytické nebo numerické řešení. Výsledkem analytického řešení, získaného za pomoci diferenciálního a integrálního počtu, je obecný vztah pro vstupující a vystupující parametry, který umožňuje jednoduše pracovat s obdobnými typy problémů. Největším úskalím však je, že nalezení analytického řešení v

uzavřeném tvaru je možné pouze pro velmi omezenou škálu úloh s jednoduchou geometrií a vysokou mírou idealizace. [25]

Numerické řešení je řešení přibližné. Podstatou numerického řešení je diskretizace spojitého problému. Proces je následně, za pomoci výpočetní techniky, řešen v konečném počtu kroků. Numerické řešení lze aplikovat na téměř každou matematicky popsanou úlohu, složitost úlohy limituje především výpočetní kapacita. Nevýhodou numerického řešení je nutnost opakování výpočtu v případě změny vstupních parametrů. [28]

8.3 Software pro numerickou simulaci

V dnešní době je v nabídce na trhu mnoho různých simulačních softwarů, nejvíce používané softwary v oblasti plošného tváření v automobilovém průmyslu jsou programy AutoForm Forming a Pam-Stamp (více v kapitole 8.3.1). Oba developeri společně s programy dodávají množství doplňkových modulů, pro specifické aplikace. Kromě klasických konvenčních metod, které se používají při tváření za studena lze pomocí rozšiřujících modulů simulovat například i procesy plošného tváření za tepla, včetně fázových přeměn, dále lze simulovat lemování, tváření pomocí nepevných nástrojů (např. hydroforming, tváření výbuchem, apod.), tváření uzavřených profilů apod. [25]

„Úskalím numerické simulace je v současnosti nedostatečná znalost a definice okrajových podmínek. Vyplývající chyby můžeme řadit mezi chyby kvalitativní, které lze odstranit podrobnějším a přesnějším popisem vstupujících parametrů. Trend zvyšování přesnosti numerické simulace je patrný i u dodavatelů materiálu, kteří postupem času poskytují stále detailnější popis dodávaného materiálu.“ [25]

V rámci simulací plošného tváření a dalších aplikací můžeme v současnosti pozorovat trend zpřesňování v následujících oblastech:

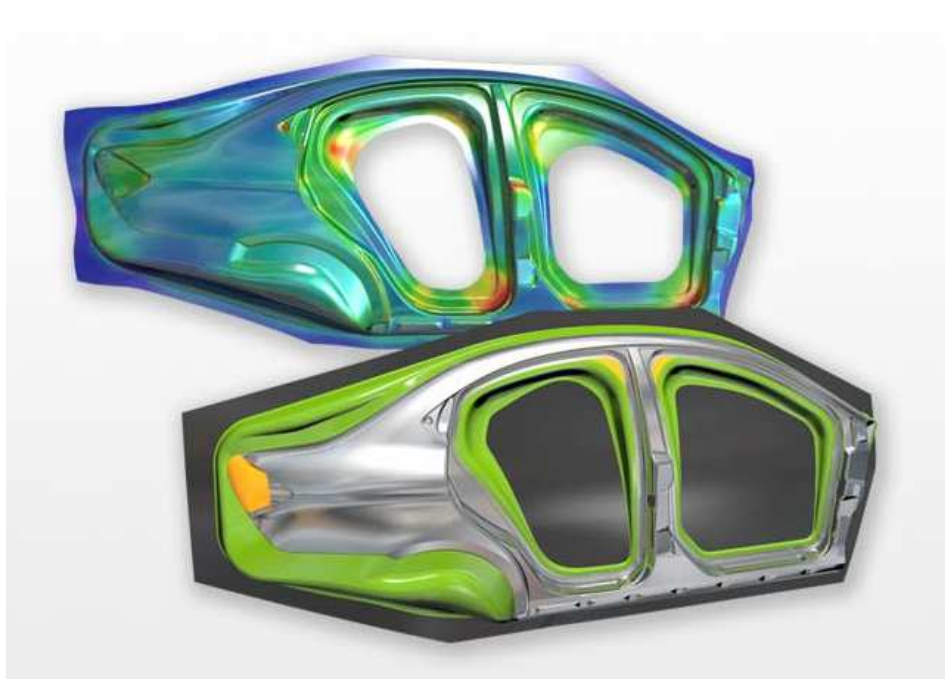
- Nelineární koeficient tření (závislý na tlaku, rychlosti, struktuře povrchu a množství maziva)
- Virtuální modifikace nástroje
- Odhalení povrchových vad na pohledových dílech
- Vliv rychlosti deformace
- Simulace kompletních sestav (kombinace technologií v jedné simulaci- např. lemování, svařování, lepení a vytvrzování lepidla)

8.3.1 Přehled simulačních softwarů využívaných v experimentu disertační práce

Níže jsou uvedeny obecné popisy simulačních softwarů, které byly v disertační práci použity pro návrh a ověření nové metodiky drážkové fixace lemového spoje. Technologie lemování není v oblasti numerických simulací novinkou. V současné době se standardně využívají simulace pro návrh a optimalizaci lemovacích plánů ve výrobě a je možné k této problematice dohledat mnoho informací a odborné literatury. V rámci disertační práce se předpokládá, že samotná základní simulace lemování pro každý případ je odladěna a tedy není nutné se podrobněji zabývat procesními parametry lemování a bude kladen zřetel pouze na samotnou mechanickou fixaci lemového spoje. [24, 30-36, 41]

AutoForm Forming

AutoForm Forming je simulační software od developerské společnosti AutoForm Engineering GmbH. Tato společnost byla založena v roce 1995 ve Švýcarsku. Tento software je jeden z nejrozšířenějších pro využití v automobilovém průmyslu. Využívají ho přední nadnárodní společnosti, jako jsou např. VW, Daimler, Volvo, Arcelor, ThyssenKrupp Steel, a mnoho dalších. V České Republice tento program využívá např. automobilka Škoda Auto a mnoho nástrojářen. Tento software má velkou výhodu díky vzájemné spolupráci s dodavateli CAD softwarů, jako např. Dassault Systemes, UGS PLM Solutions a nejnámější CATIA.



Obr. 8.10 – Příklad simulace postranice karoserie

Pomocí softwaru je možné nastavit simulace a vyhodnotit všechny důležité výsledky související se sledovanými procesy plošného tváření. Program umožňuje nastavit alternativní návrhy procesů a definovat geometrie nástrojů pro tváření, lemování a další operace. Pro samotné simulační úlohy je možné využít buď importované entity (generované pomocí aplikací CAD), nebo geometrie vytvořené pomocí softwaru AutoForm. Pomocí synchronizovaných pohledů na více návrhů je možné sledovat postup identifikovaných problémů a rychle je porovnávat. To nejen usnadňuje detekci problémů, ale také zrychluje proces hledání optimálního řešení.

AutoForm Assembly R9.1

Portfolio softwaru AutoForm Assembly podporuje celý pracovní postup montáže sestav např. v oddělení svařovny automobilového závodu (BiW procesy), který zahrnuje řízení tolerance a kvality, procesní inženýrství i zkušební fáze a korekční smyčky ve skutečné výrobě. Software je od stejné developerské společnosti jako AutoForm Forming. Pomocí aplikace je možné nastavit simulace a vyhodnotit všechny důležité výsledky související s výrobními procesy v oblasti sestav karoserie. Tento software tedy pokrývá i oblast procesů spojování, jako je odporové svařování, laserové svařování a pájení, klinčování, lemování, lepení a vytvrzování.



Obr. 8.11 – Příklad sestavy karoserie vozu

Simufact Forming

Simufact Forming je simulační nástroj pro profesionály zabývající se procesy tváření. Simufact Forming vyniká svým srozumitelným prostředím a zaškolení pro práci se softwarem trvá jen krátkou dobu. Simufact Forming bere v úvahu všechny oblasti technologie tváření, a proto zajišťuje vysoce realistickou simulaci procesů. Z toho důvodu dosahuje vysokého stupně přesnosti výsledků pomocí definovaných okrajových podmínek.

Tento software nabízí dvě numerické metody výpočtu simulace, které se navzájem doplňují:

- Řešič konečných objemů založený na explicitním řešiči Dytran společnosti MSC se používá pro obzvláště efektivní simulaci procesů kování za tepla s významnou tvorbou otřepů
- K simulaci všech typů procesů se používá řešič konečných prvků založený na implicitním řešiči Marc pro nelineární aplikace



Obr. 8.12 – Možnosti simulací v softwaru Simufact Forming

Deform-3D

System Deform je inženýrský software od společnosti SFTC, který konstruktérům umožňuje analyzovat procesy tváření, tepelného zpracování, obrábění a mechanického spojování kovů na počítači, nikoli v dílně metodou pokusů a omylů. Deform se osvědčil jako mimořádně efektivní v široké škále výzkumných a průmyslových aplikací.

Deform je výkonný systém pro simulaci procesů určený k analýze trojrozměrného (3D) toku složitých procesů tváření kovů. Je to praktický a účinný nástroj pro předvídání toku materiálu při průmyslovém tváření bez nákladů a zdržení při dílenských zkouškách. Typické aplikace například zahrnují:

- Zápustkové kování
- Volné kování
- Válcování
- Hluboké tažení

Výpočet je založen na metodě konečných prvků. Deform je jeden z nejrozšířenějších simulačních programů na světě, který používají přední výzkumné ústavy a někteří výrobci.

Porovnání simulačních softwarů s ohledem na produkční praxi:

Jednotlivé simulační softwary uvedeny výše, které jsou využity pro experiment disertační práce jsou odlišné především svým zaměřením a rozdílnou metodou výpočtu, která způsobuje velké rozdíly v potřebném výpočetním čase jednotlivých simulací. Zatímco softwary Deform a Simufact jsou vhodnější spíše pro výzkumné účely, kde se využívají pro výpočet objemové elementy a výpočtové časy simulací jsou i u jednoduchých projektů relativně dlouhé, tak softwary AutoForm Forming a Assembly jsou primárně určeny pro produkční praxi a výpočetní časy jsou krátké a uživatelské prostředí je velice přívětivé.

8.4 Ověření drážkové fixace v softwaru Simufact

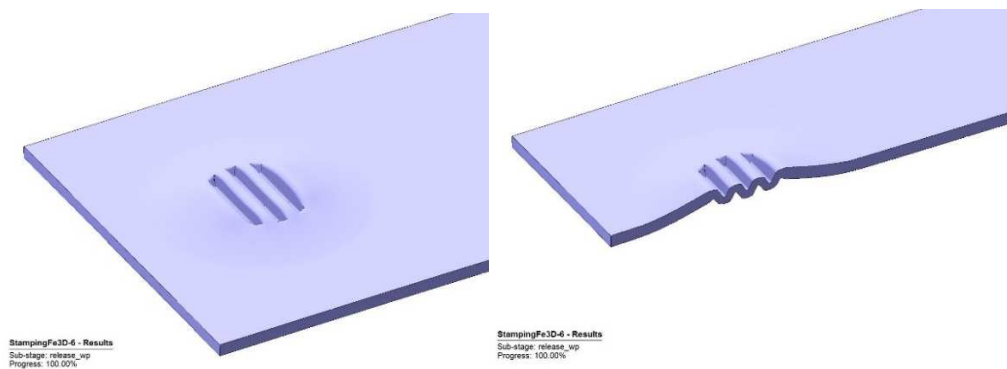
Pomocí softwaru Simufact je možné simulovat tvářecí proces hlubokého tažení pro malé a ostré geometrie. Takový typ geometrie je velmi obtížné pomocí simulací analyzovat v programech, které se běžně využívají pro určení optimální metody výroby v automobilovém průmyslu. Běžně používané softwary (AutoForm Forming, Pam-Stamp) pro numerické simulace výroby karosářských dílů v automobilovém průmyslu jsou převážně koncipovány na

velkoplošné výlisky. Cílem simulace v tomto softwaru je hlavně ověřit hypotézu vytvoření mechanického zámku na lemovém spoji. [P4]

Jak vyplývá z navrženého řešení nové drážkové fixace lemového spoje, kde již byl proveden experiment pro ověření funkčnosti nástrojů, je nejprve nutné nastavit a provést simulaci prvního funkčního prvku fixace lemového spoje – drážek. Okrajové podmínky pro simulaci byly zvoleny následovně: [P4]

- Materiál: DC04 z databáze softwaru Simufact, upraveno na DX54D dle materiálového listu
- Tloušťka materiálu: 0,65 mm
- Teplota nástrojů: 20°C
- Teplota polotovaru: 20°C

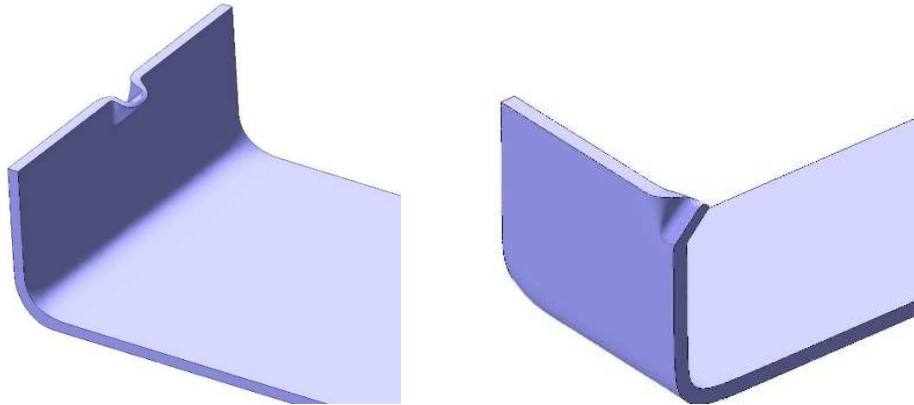
Na obrázcích č. 8.13 a 8.14 je možné vidět výstup ze samotné simulace v plném pohledu a v řezu. Samotná simulace drážkování proběhla úspěšně. Výsledek ze simulace je použit, jako vnitřní díl pro další simulaci lemování. [P4]



Obr. 8. 13 – Simulace drážkového profilu [P4]

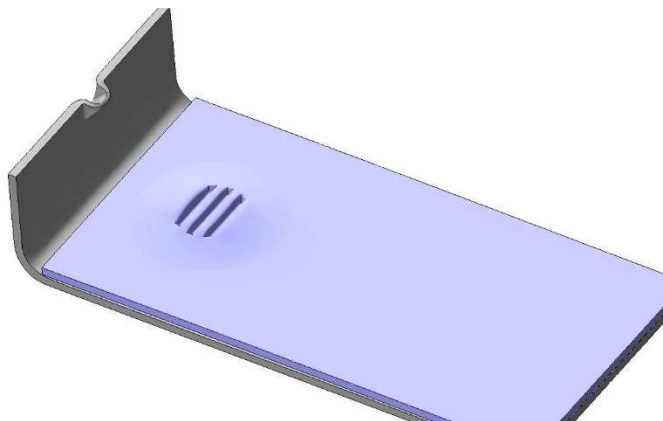
Jako krok druhý bylo potřeba provést simulaci ražení speciálních háčků na stojině plechu. Okrajové podmínky pro operaci jsou voleny stejně, jako v předchozí operaci, ovšem s použitím jiného materiálu. [P4]

- Materiál: HX180BD



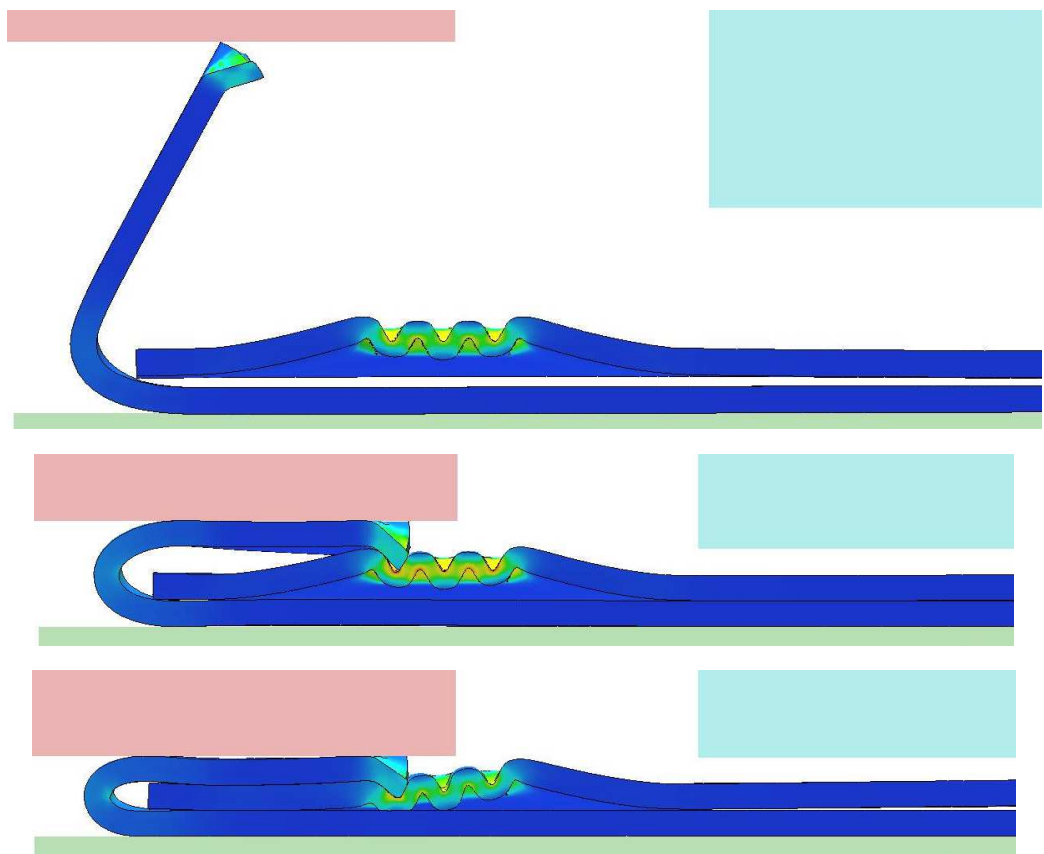
Obr. 8.14 – Simulace výstupků na stojině plechu [P4]

Po úspěšných výsledcích simulací, kde byla ověřena funkčnost navrženého řešení nástrojů fixačních prvků lemového spoje, logicky následuje další krok. Třetím a závěrečným krokem je simulace vlastního lemování. Pro simulaci lemování jsou použity oba výsledky pro vnější i vnitřní díl. Na obrázku č. 8.15 je vyobrazena sestava vnitřního i vnějšího dílu, která je tímto způsobem připravena pro simulaci lemování. [P4]

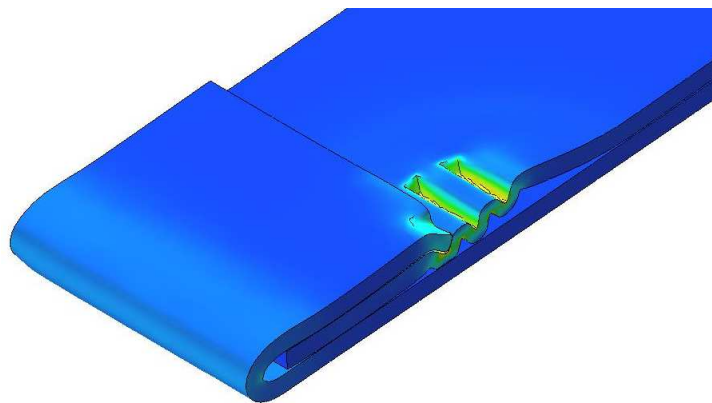


Obr. 8.15 - Sestava vnějšího a vnitřního dílu před lemováním

Na následujícím obrázku (Obr. 8.16 a Obr. 8.17) je znázorněno lemování v počáteční fázi a několik posledních časových kroků lemování, kdy dochází k vytvoření mechanického zámku, který slouží k zajištění rozměrové stability spojovaných dílů.



Obr. 8.16 – Simulace lemování v SW Simufact [P4]



Obr. 8.17 – 3D pohled v řezu [P4]

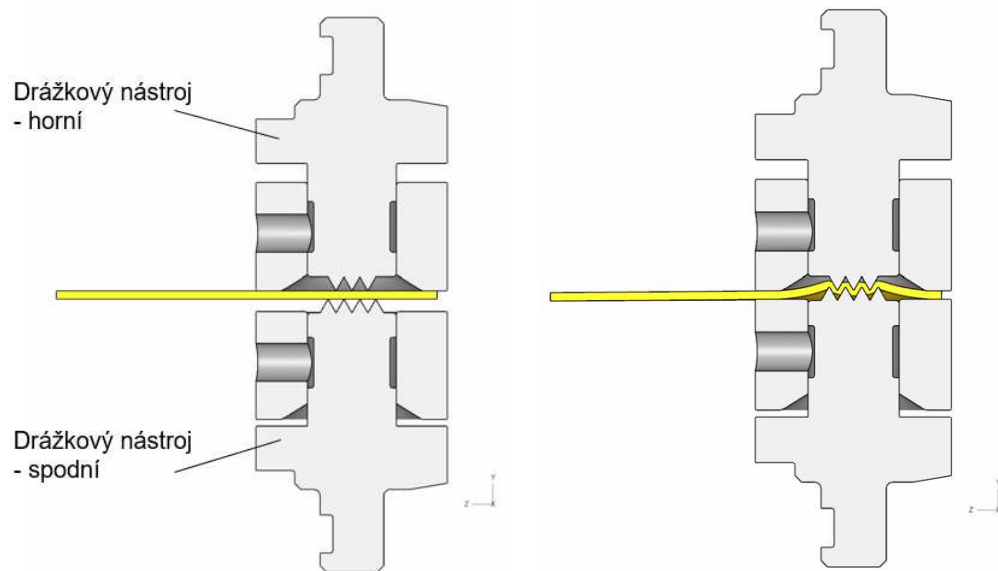
Z výsledků simulace byla potvrzena navržená hypotéza nového řešení mechanické fixace lemového spoje. Samotná simulace byla provedena ve zjednodušené formě procesu lemování, tzn. bez využití lemového lepidla a samotný proces lemování byl rozdělen na dva kroky – předlemování a dolemování.

8.5 Ověření navržené metody pomocí softwaru Deform a návržení optimálních parametrů pro nastavení nástrojů drážkové fixace

Pro dvojitě potvrzení navržené hypotézy byla provedena další analýza navrženého řešení pomocí dalšího simulačního softwaru, konkrétně software Deform v.11.2.

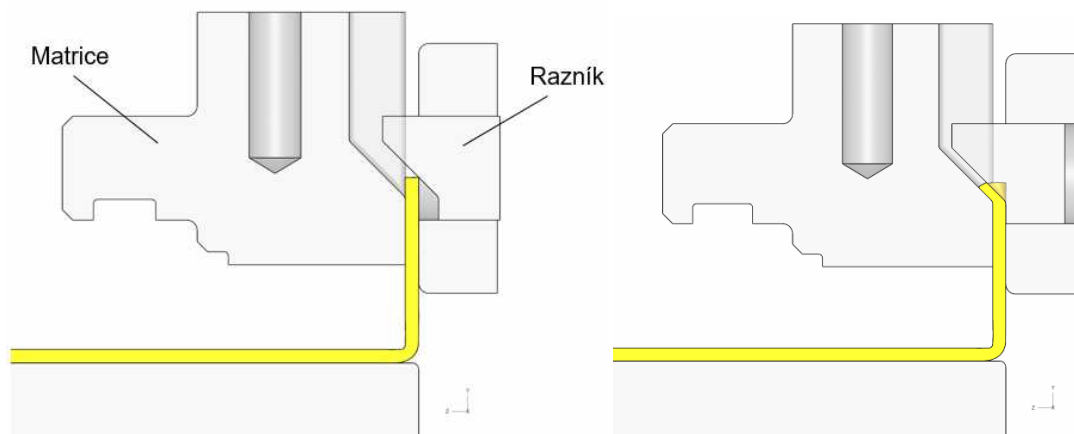
Jako vstupní okrajové podmínky byly využity stejné parametry jako u předchozí simulace (viz kapitola 8.4).

Na Obr. 8.18 je snímek ze simulačního softwaru, kde je na levé straně zobrazen plech v nástroji pro vyhotovení drážek. Na straně pravé je zobrazen výsledek simulace ražení drážek do plechu. [P4]



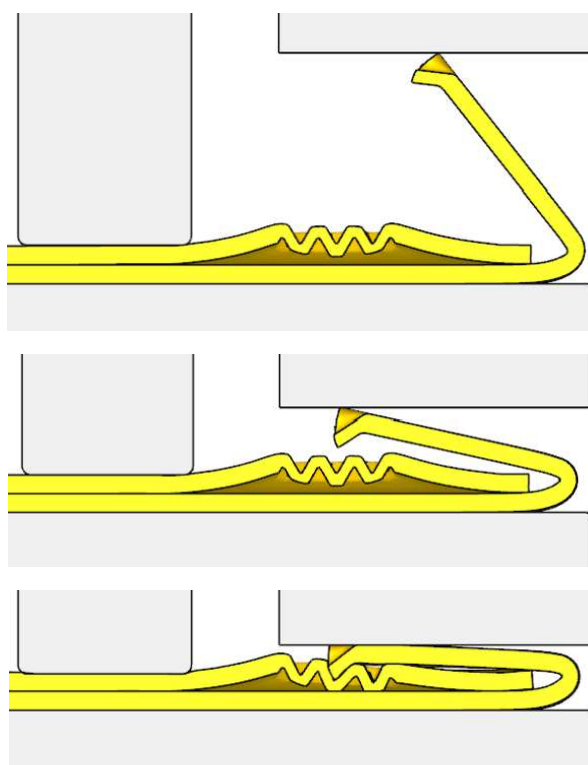
Obr. 8.18 – Simulační úloha ražení drážek před výpočtem a po výpočtu [P4, P11]

Na Obr. 8.19 je snímek ze simulačního softwaru, kde je na levé straně zobrazen plech v nástroji pro vyhotovení háčků na stojině lemu. Na straně pravé je zobrazen výsledek simulace po vyražení výstupku do stojiny. Nástroj má integrovaný přidržovač, který zajišťuje stálost polohy plechu pro ražení. [P4, P11]



Obr. 8.19 – Simulační úloha ražení háčků před výpočtem a po výpočtu [P11]

Jako poslední krok bylo nutné provést simulaci samotného lemování. Stejně jako tomu bylo u simulace v softwaru Simufact, tak i zde je zachován zjednodušený model lemování. To znamená, že úloha lemování je sestavena pro klasické konvenční lemování, rozdělené do dvou kroků za využití lemovacích vložek pro předlemování a dolemování. Zároveň v této zjednodušené úloze není uvažováno s vrstvou lemového lepidla. Výstupy ze simulace lemování jsou zobrazeny v několika časových krocích níže na Obr. 8.20. [P4]



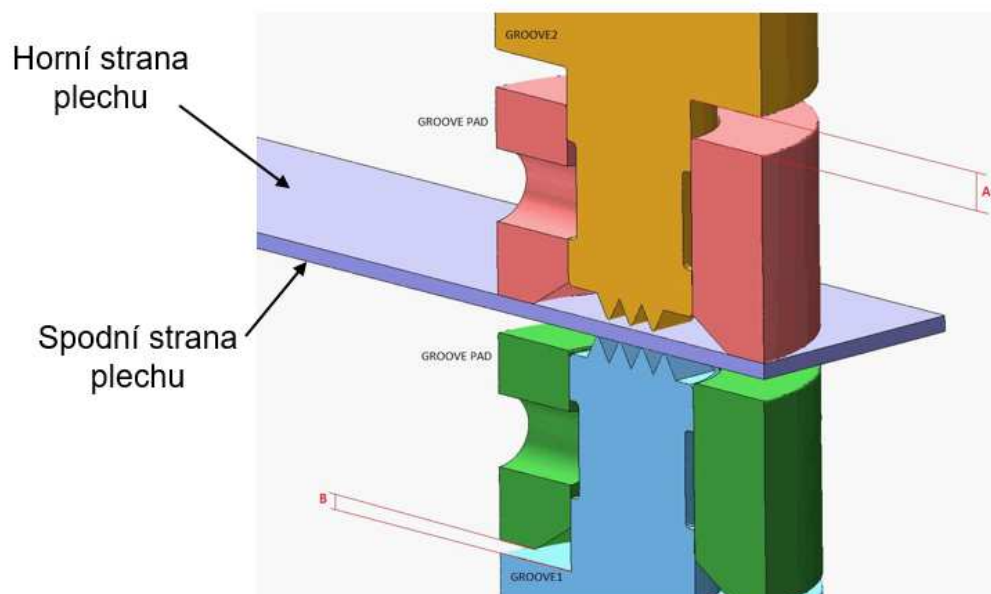
Obr. 8.20 – Simulace lemování v softwaru Deform-3D [P4]

Z výsledků simulace v softwaru Deform je zřejmé, že i v tomto případě je hypotéza vytvoření mechanického spojení potvrzena. Při zevrubném vizuálním srovnání výsledků ze softwaru Simufact a Deform je možné sledovat shodné chování dílů v obou simulacích. Důvod pro využití obou softwarů pro tento krok je mimo jiné ověření jejich schopností pro „nestandardní“ proces lemování. V případě, že se oba výsledky shodují, je možné pokračovat pouze v jednom simulačním softwaru (kde se využívá metoda konečných objemů pro výpočet) a určit optimální parametry jednotlivých elementů fixace lemového spoje.

Nastavení optimálních parametrů elementů fixace

V následujících krocích je nutné se zaměřit na určení optimálních parametrů nastavení nástrojů, které jsou použity pro samotné formování speciálních fixačních prvků – drážek a výstupků na plechových dílech. Samotná konstrukce nástrojů, jak bylo popsáno v kapitolách 7.3.2 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek do vnitřního plechu a 7.3.3 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků do stojiny na vnějším plechu, umožňuje pomocí několika jednoduchých kroků změnit geometrii nástrojů tak, že je možné dosáhnout různých jmenovitých výšek drážek a háčků.

U nástroje, který slouží k ražení drážek do plechu, je možné měnit výšku usazení objímek u horního i spodního nástroje pomocí tenkých podložek. Podložkováním lze tedy měnit parametry označeny písmeny A a B na obázku 8.21. Pro první sérii experimentu byly využity zvolené počáteční parametry: $A = 1,55 \text{ mm}$ a $B = 0,52 \text{ mm}$. [P11]



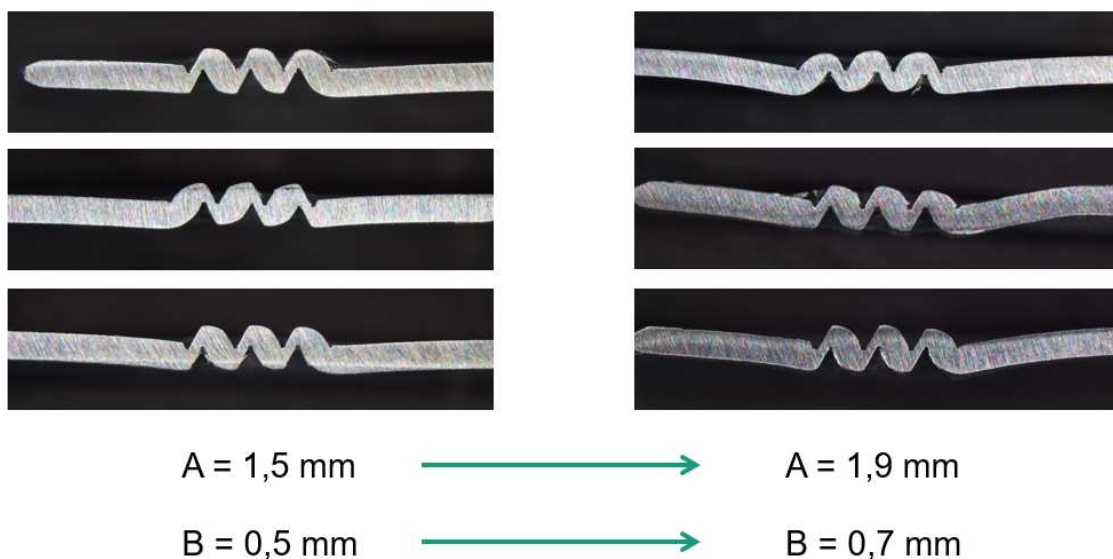
Obr. 8.21 – Zobrazení parametrů A a B na drážkovém nástroji [P11]

Pro určení a nastavení optimálních parametrů drážkového nástroje byl proveden experiment, kde byla sestava nástrojů upnuta v pneumatických kleštích. [P11]



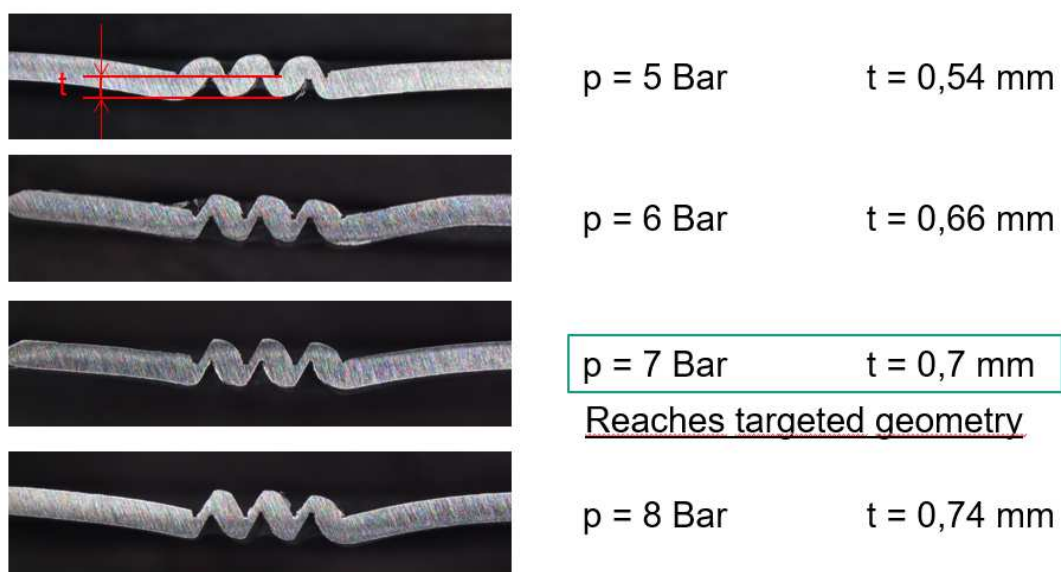
Obr. 8.22 - Drážkový nástroj upnutý v pneumatických kleštích

V rámci tohoto experimentu bylo otestováno různé nastavení drážkového nástroje a jednotlivé zkušební vzorky byly analyzovány pod mikroskopem, kde byl sledován tvar drážkového profilu. Obrázky jednotlivých řezů drážkového profilu na zkušebních vzorcích jsou zobrazeny na Obr. 8.23. Pomocí tohoto měření bylo určeno, že optimální nastavení nástroje pro danou kombinaci materiálů by mělo odpovídat parametrům $A = 1,9 \text{ mm}$ a $B = 0,7 \text{ mm}$. [P11]



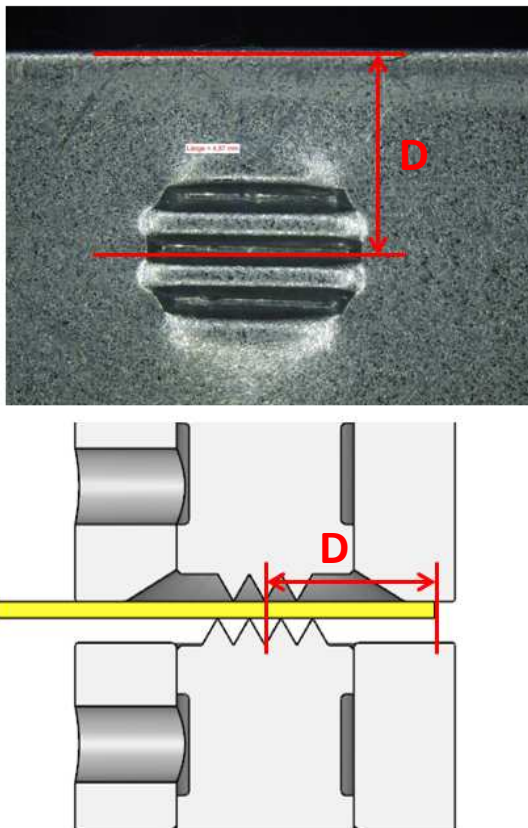
Obr. 8.23 - Řezy zkušebními vzorky pro nastavení drážkového nástroje [P11]

Dalším sledovaným a optimalizovaným parametrem byl tlak dodávaný do pneumatických kleští. Díky různému tlaku je možné regulovat sílu ražení a tím i míru „prolisování“ drážek. Sledovaným parametrem byla tedy hloubka drážky v závislosti na dodaném tlaku. Na Obr. 8.24 je možné vidět různé hloubky za využití různého tlaku. Z experimentu vyplynulo, že optimální hodnota tlaku je 7 Bar, při které je možné dosáhnout hloubky drážky cca 0,7 mm. [P11]



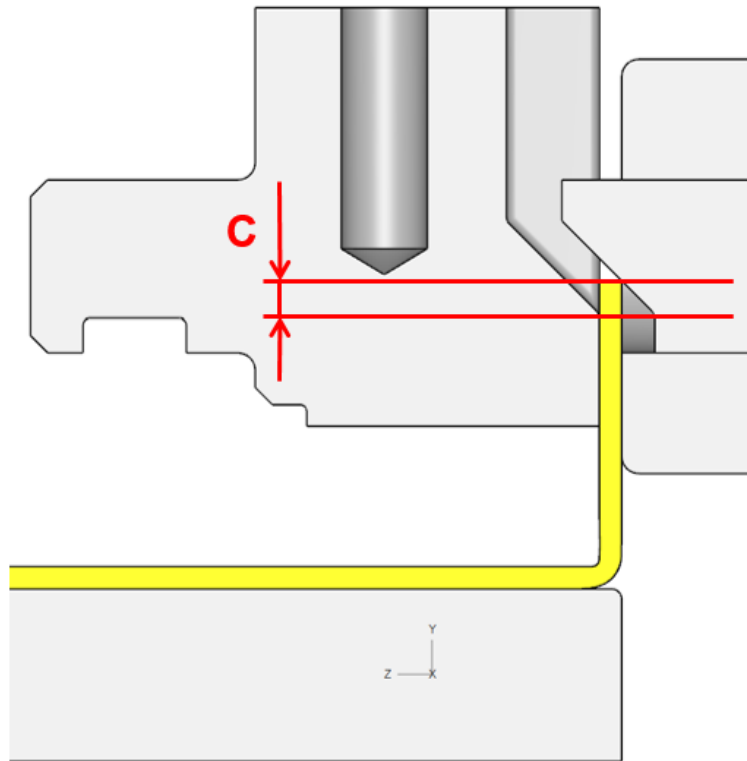
Obr. 8.24 - Vliv tlaku na hloubku drážek [P11]

Posledním parametrem, který je důležitý pro výrobu drážek fixace na vnitřním plechovém dílu je pozice drážkového profilu od hrany plechového dílu (parametr D), viz Obr. 8.25. Tento parametr je velice důležitý s ohledem na zajištění správné funkčnosti fixace lemového spoje. Při nedodržení optimálního nastavení, nemusí dojít k vytvoření mechanického uzamčení spoje. Optimální vzdálenost středu nástroje od hrany plechu byla určena pomocí několika experimentů a je cca 4,9 mm. Tato hodnota je určena výhradně a pouze pro danou modelovou situaci experimentu, jelikož poloha drážek na vnitřním díle úzce souvisí s rozměry lemového spoje, resp. délky stojiny a umístění vnitřního dílu vůči vnějšímu. Metodika určení optimální vzdálenosti je popsána dále v textu. [P11]



Obr. 8.25 - Nastavení pozice drážkového profilu vůči hraně dílu [P11]

Pomocí kombinace reálného experimentu a numerické simulace byla určena i optimální výška výstupku – háčku, která je vyražena na stojině plechového dílu a společně s drážkovým profilem po zalemování tvoří pevný mechanický spoj. Konstrukce nástroje pro ražení výstupku na okraj stojiny vnějšího plechového dílu je provedena tak, že umožňuje vyhotovení různé výšky výstupku v závislosti na míře „zanoření“ plechu do nástroje, viz Obr. 8.26 níže. [P11]

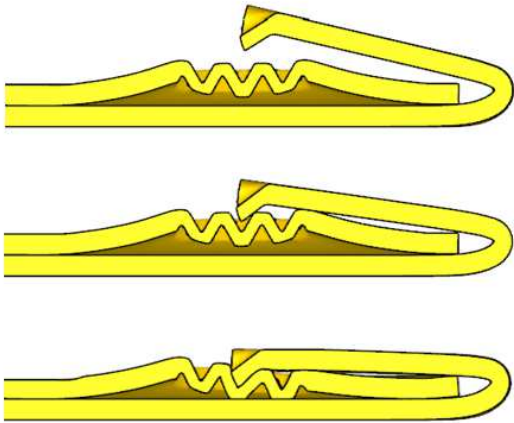


Obr. 8.26 – Parametr zanoření plechu do nástroje - C [P11]

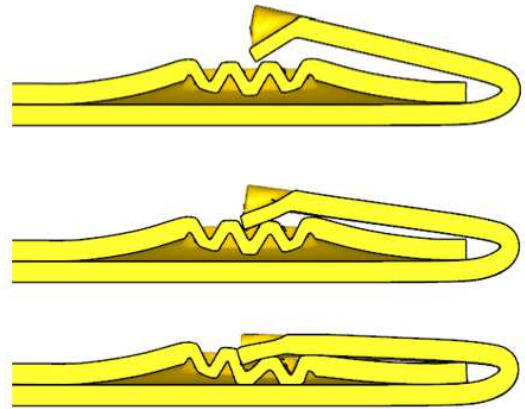
Míra zanoření, tedy parametr C, je měřena od hrany plechu k hraně matriční dutiny nástroje. Čím je tato hodnota vyšší, tím je možné dosáhnout většího (vyššího) výstupku na plechovém dílu.

Pomocí numerické simulace bylo určeno, že optimální výška výstupku pro vytvoření pevného mechanického spoje je 0,7 mm. Pokud by byla výška vyšší, např.: 1 mm, tak by v průběhu lemování došlo k „rozmáčknutí“ výstupku, a to by vedlo k nepevnému spojení. Celá sestava mechanické fixace je citlivá na dodržení nastavených optimálních parametrů. Pokud tyto parametry nejsou dodrženy, nemusí k pevnému spojení dojít. [P11]

Výška výstupku: 0,7 mm

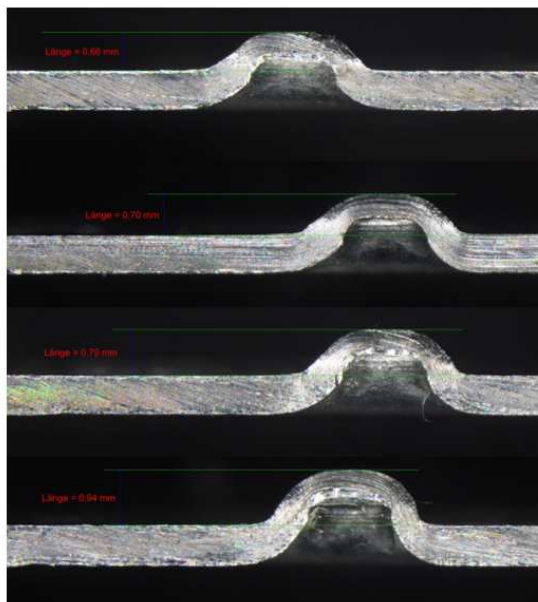


Výška výstupku: 1,0 mm



Obr. 8.27 - Různá výška výstupků a její vliv na vytvoření spoje [P11]

Pomocí reálného experimentu bylo ověřeno, že pro dosažení výšky výstupku 0,7 mm, tedy hodnoty, která byla určena pomocí numerické simulace a tato výška výstupku by měla zajistit pevný spoj, je nutné uvažovat míru zanoření plechu do nástroje v hodnotě $C = 1,1$ mm. Na obrázku níže (Obr. 8.28) jsou vyobrazeny různé průběhy výšek výstupku, včetně optimální $h = 0,7$ mm. [P11]



$C = 1$ mm

$h = 0,66$ mm

$C = 1,1$ mm

$h = 0,70$ mm

$C = 1,2$ mm

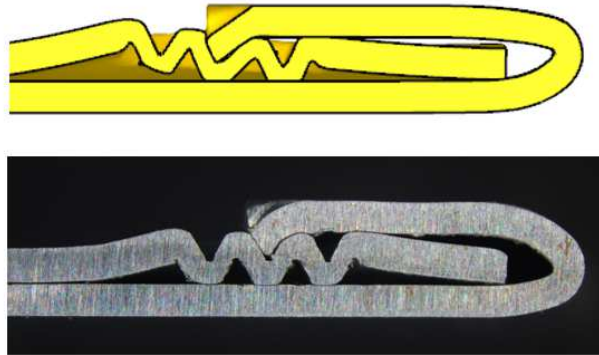
$h = 0,79$ mm

$C = 1,4$ mm

$h = 0,94$ mm

Obr. 8.28 – Srovnání jednotlivých vzorků pro různý parametr C [P11]

Pokud jsou dodrženy všechny hodnoty parametrů, které byly určeny jako optimální pro správnou funkci drážkové fixace lemového spoje, dojde ke vzniku mechanického uzamčení lemového spoje. Na Obr. 8.29 je zobrazen finální výstup z numerické simulace, kde byly nastaveny optimální parametry, jejichž hodnoty jsou uvedené v textu. Dále je na stejném obrázku pohled v řezu reálným zkušebním vzorkem. S ohledem na velikost spoje lze konstatovat, že výstup z numerické simulace a řez reálným vzorkem se shodují. [P11]



Obr. 8.29 - Porovnání výsledku simulace a reálného lemového spoje s drážkovou fixací [P11]

Dále bylo nutné provést zkoušky na větším zkušebním vzorku, který reprezentuje zjednodušený panelový díl karoserie automobilu. Zkušební vzorek se skládá z taženého vnitřního dílu a z vnějšího dílu, kde je již připravena stojina lemu, která svírá se zbytkem vnějšího dílu úhel o velikosti 90° . Hrany vnějšího i vnitřního dílů jsou rovné, díky tomu by mělo následné lemování proběhnout bez větších obtíží. [P11]

Velikost vzorku zároveň umožňuje umístit více fixačních bodů podél hrany spojovaných dílů. Právě díky umístění fixačních prvků podél celého obvodu panelového dílu by mělo být dosaženo celkové rozměrové stability panelového dílu automobilu. Fotografie zkušebního vzorku s více fixačními prvky jsou níže na Obr. 8.31 a Obr. 8.32. Detailní pohled shora na již hotový lem s jednou pozicí drážkové fixace je na Obr 8.30. [P11]



Obr. 8.30 - Detailní pohled shora na lem s drážkovou fixací. [P11]



Obr. 8.31 - Sestava zkušební vzorku připravená pro lemování [P11]



Obr. 8.32 - Zalemovaný zkušební vzorek s více pozicemi drážkové fixace [P11]

8.5.1 Pevnost lemového spoje s drážkovou fixací

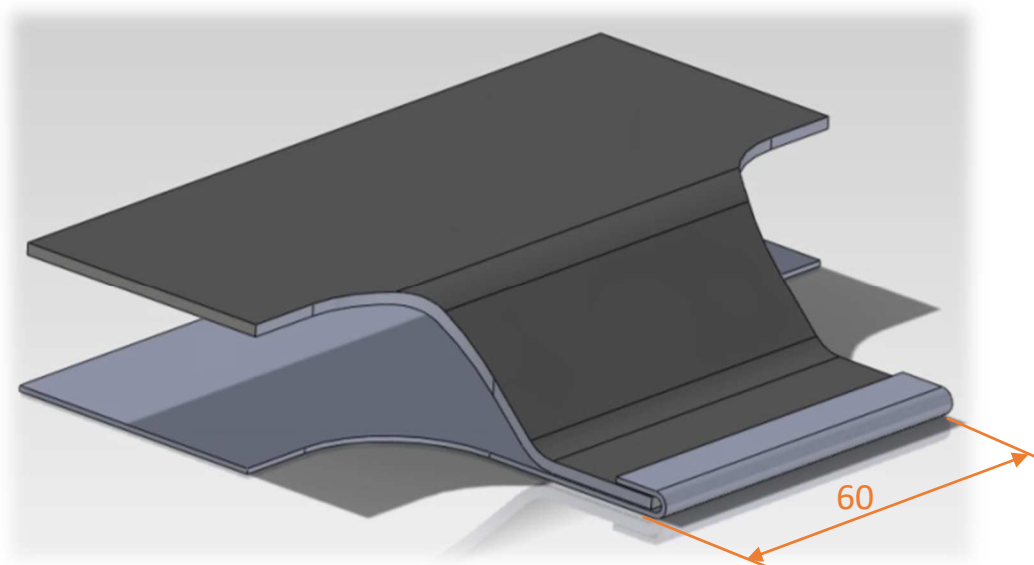
Nedílnou součástí ověření hypotézy drážkové fixace lemového spoje je provedení experimentu pevnosti spoje. Jak již bylo zmíněno, zalemovaný spoj je namáhán už ve fázi výrobního procesu, kdy na něj působí vnější vlivy během manipulace a montáže ke zbytku karoserie. Dále spoj může být namáhán při běžném provozu (otevírání/zavírání panelového dílu, rázy od nerovností na vozovce apod.). [P11]

Cílem ověření pevnosti lemového spoje je finální ověření hypotézy, že samotný lemový spoj s drážkovou fixací dokáže plnit pevnostní funkci a odolat vnějším vlivům, které mohou působit na spoj. [P11]

Metodiku zkoušek pevnosti spoje je nutné volit tak, aby proveditelnost byla rychlá, levná a realizovatelná. Proto je vhodné zkoušky provést na zkušebním stroji, který spolupracuje s výpočetní technikou, za jejichž pomocí je možné testy vyhodnotit. Z výše uvedených důvodů byla zvolena statická zkouška tahem na univerzálním zkušebním stroji, kdy právě tahové namáhání odpovídá reálnému zatěžování spoje ve výrobě. [P11]

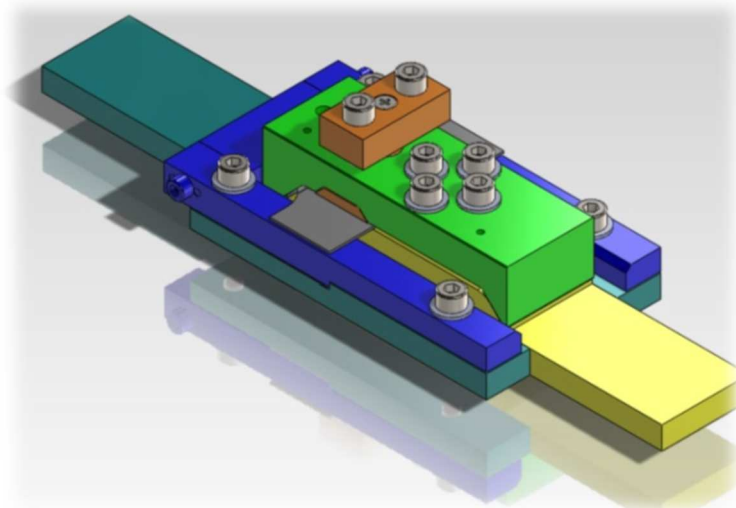
Lemový spoj je tedy zkoušen na vytržení vnitřního dílu z vnějšího, kdy se očekává, že drážková fixace bude odolávat určité velikosti zatížení spoje. [P11]

Použité zkušební vzorky byly vyhotoveny úpravou vzorků z předešlých experimentů. Tvar zkušební vzorku využitý pro určení pevnosti spoje je zobrazen na Obr. 8.33.



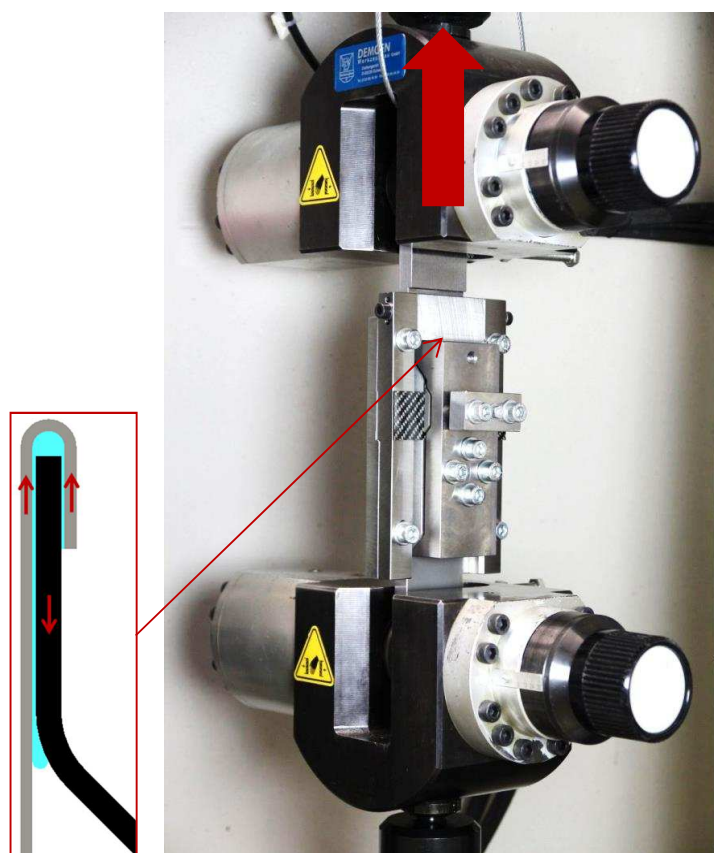
Obr. 8.33 - Tvar zkušební vzorku pro určení pevnosti lemového spoje s fixací [P11]

Pro tento tvar zkušebních vzorků bylo nutné i navrhnout a zkonstruovat speciální přípravek pro upnutí vzorku v univerzálním zkušebním stroji. Na Obr. 8.34 je zobrazen 3D model upínacího přípravku. [P11]



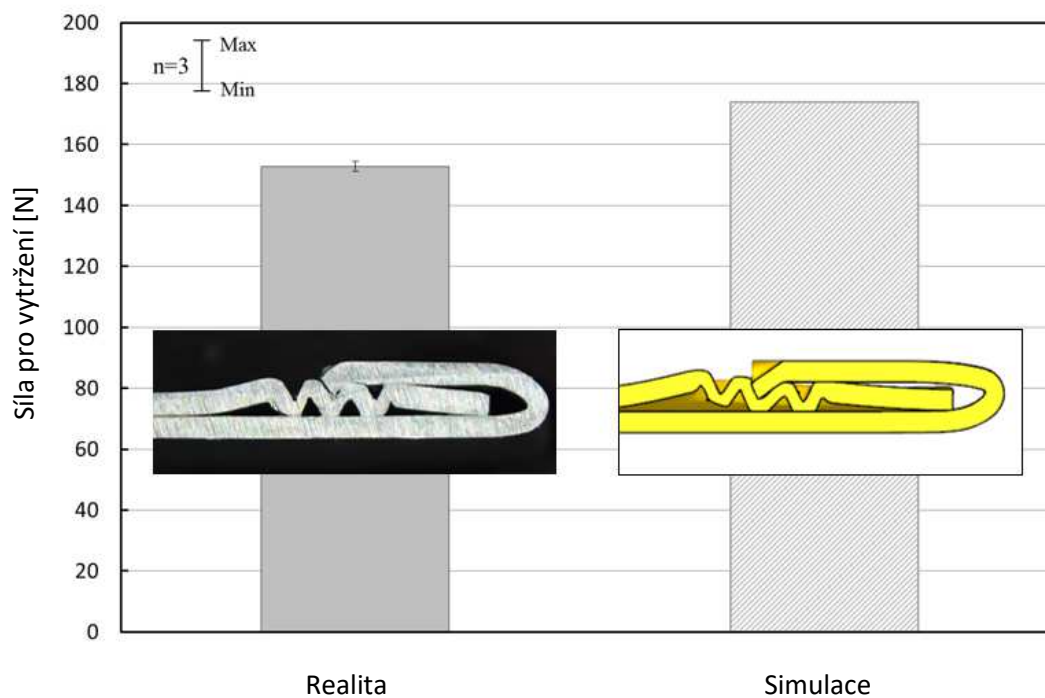
Obr. 8.34 - 3D model upínacího přípravku pro test pevnosti

Dále na Obr. 8.35 je fotografie již reálného speciálního přípravku upnutého v čelistech univerzálního zkušebního stroje. Na stejném obrázku č. 8.33 je i znázorněn princip zkoušky pevnosti spoje tzv. „na vytržení“. [P11]



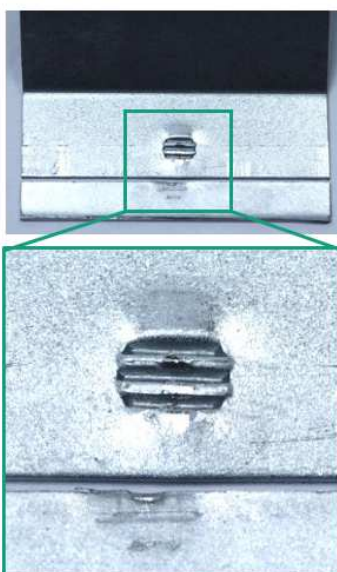
Obr. 8.35 - Princip zkoušky pevnosti a upínací přípravek v univerzálním zkušebním stroji
[P11]

Samotný experiment byl proveden jak na reálných zkušebních vzorcích, tak i ve virtuálním prostředí za pomoci simulačního softwaru Deform. Výsledky zkoušky pevnosti jsou zaznamenány na Obr. 8.36, kde na levé straně je záznam průměrné síly (z počtu 3 vzorků) potřebné na vytržení u reálného vzorku a na pravé straně je výsledek z numerické simulace.



Obr. 8.36 - Pevnost spoje – realita vs. simulace [P11]

Na Obr. 8.37 je v detailu zaznamenán zkušební vzorek po zkoušce pevnosti, tedy po vytržení vnitřního dílu s drážkovým profilem z lemu vnějšího dílu s výstupkem. [P11]



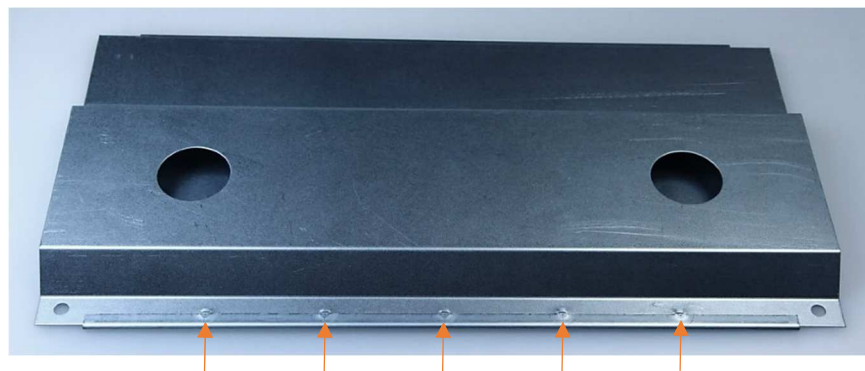
Obr. 8.37 - Zkušební vzorek po vytržení

Z výsledků reálné zkoušky pevnosti vytržením bylo určeno, že jedna pozice drážkové fixace lemového spoje dokáže odolat zatížení o velikosti 155 N. Tato hodnota je menší v porovnání s výsledkem zkoušky pevnosti ve virtuálním prostředí. Hodnota pevnosti spoje ve virtuálním prostředí dosahuje až 175 N, to je ovšem způsobeno zanedbáním složky elastické deformace v numerické simulaci. Určená pevnost spoje je dostačující s ohledem na skutečnost, že vždy je využito více fixačních prvků po celém obvodu panelového dílu a při zohlednění hmotnosti obvyklých panelových dílů. Obecně lze tedy konstatovat, že jeden fixační bod odolá statickému zatížení, které odpovídá zavěšenému dílu o hmotnosti 15 kg. [P11]

8.5.2 Kontrola kvality povrchu

S ohledem na požadovanou kvalitu panelových dílů karoserie automobilu je v rámci technologie lemování nutné kontrolovat stav a kvalitu povrchu vnějšího pohledového plechu panelového dílu karoserie automobilu (viz. kapitola „3.3 Příklad auditové kontroly po lemování v reálném provozu“). Ve výrobě tyto díly prochází auditovou kontrolou, kde jsou všechny díly, které prošly procesem lemování kontrolovány brouskovou metodou a některé díly jsou dále kontrolovány i pomocí speciálních měřících zařízení. Je nežádoucí, aby proces lemování negativně ovlivňoval pohledový povrch panelových dílů. Z toho důvodu je nutné provést kontrolu kvality pohledového dílu na různé propady a další vady, které by mohly negativně ovlivnit vzhled dílu. U drážkové fixace lemového spoje existuje určité riziko, že při nedodržení nastavení určených parametrů pro ražení drážek a výstupků, může v důsledku nedodržení těchto parametrů dojít v povrchovým vadám po samotném lemování z důvodu „propisu“ fixačních elementů na vnější díl sestavy.

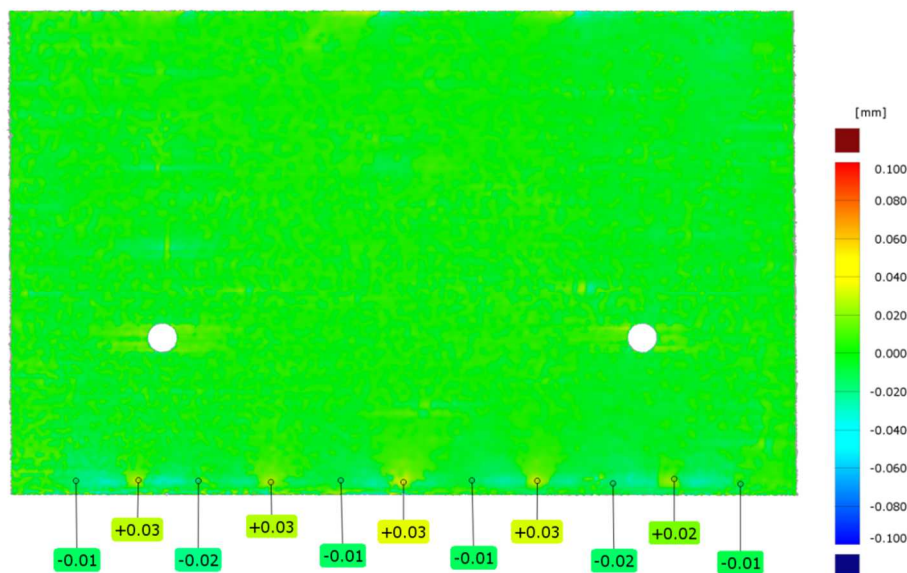
Pro samotné vyhodnocení kvality povrchu byl vybrán zkušební vzorek s několika fixačními elementy umístěnými vedle sebe (Obr. 8.38).



Obr. 8.38 - Zkušební vzorek pro hodnocení povrchu s vyznačenými pozicemi fixace

Zkušební vzorek byl umístěn na speciální měřicí stůl a jeho vnější strana byla nasnímána speciálním scannerem ATOS (podrobnější informace v příloze), který zaznamenal přesně povrch dílu do elektronického formátu. Pomocí softwaru GOM bylo následně provedeno vyhodnocení vnější strany zkušební vzorku, sledovaným parametrem byly odchylky ve směru normály od povrchu dílu vůči referenci – tedy vůči ideálnímu povrchu. Na Obr 8.39 jsou zaznamenány jednotlivé odchylky povrchu podél hrany lemového spoje. Z výsledků vyplývá, že maximální odchylka v povrchu dílu je 0,04 mm. Tato hodnota je naprosto zanedbatelná

z hlediska auditové kvality povrchu panelového dílu karoserie a je možné tedy takto nalazený proces drážkové fixace lemového spoje pro zvolené materiály a jejich tloušťky prohlásit za finální a konečný a vyhovující. [P11]



Obr. 8.39 - Analýza kvality povrchu v softwaru GOM [P11]

Pro všechny další experimenty a kroky v rámci této disertační práce budou zvoleny následující parametry drážkové fixace: [P11]

- Nastavení drážkového nástroje:
 - A = 1,9 mm
 - B = 0,7 mm
 - p = 7 Bar
- Nastavení výstupkového nástroje:
 - C = 1,1 mm

Parametr vzdálenosti drážkového profilu od hrany plechového dílu D musí být určen vždy individuálně.

8.6 Experiment simulace fixace s využitím SW AutoForm Forming

Jak již bylo uvedeno, software AutoForm Forming je jeden z nejrozšířenějších simulačních softwarů, který se používá ve fázi návrhu výroby jednotlivých dílů karoserie automobilu v praxi. Díky jednoduchému, uživatelsky příjemnému prostředí, je práce se softwarem snadná a výpočetní časy pro jednotlivé simulace umožňují uživatelům efektivní práci.

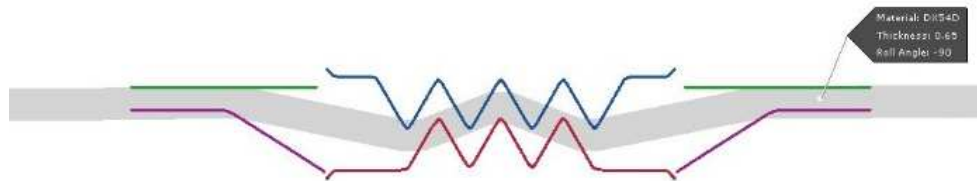
S ohledem na hlavní zaměření simulačního softwaru Autoform Forming (pozn. software je designován primárně pro velkoplošné díly karoserie automobilu), je nejprve nutné ověřit možnost simulace tváření jednotlivých fixačních prvků a potvrdit, zda je vůbec možné tento software použít pro takový typ geometrií. [P6]

Jako první krok bylo provedeno ověření tváření drážkového profilu v softwaru. Pro samotný výpočet simulace je potřeba kromě zadání okrajových podmínek simulační úlohy zadefinovat i parametry přesnosti výpočtu softwaru. Specificky nastavené parametry výpočtu simulace mohou ovlivnit celkový výsledek a přesnost výsledku. V tomto případě bylo pro výpočet ražení drážkování nastaveno celkem 5 strategií – CE (Concept Evaluaion), CE+, FV (Final Validation), UD₁ a UD₂ (User Defined 1 a 2). Parametry nastavení výpočtu pro jednotlivé strategie jsou zobrazeny v tabulce 6 níže, s tím že první tři strategie jsou defaultně předdefinované přímo v softwaru a poslední dvě strategie jsou upraveny manuálně. [P6]

Tab. 6 Strategie nastavení parametrů simulačního výpočtu [P6]

Strategie	CE	CE+	FV	UD ₁	UD ₂
Nastavení importu CAD geometrie					
Vzdálenost stehů sítě [mm]	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
Tolerance zasít'ování [mm]	0.10	0.05	0.05	0.05	0.05
Max. délka elementu[mm]	50.0	30.0	10.0	10.0	10.0
Nastavení výpočtu					
Penetrace hrany [mm]	0.22	0.22	0.22	0.15	0.09
Max. úhel elementu[°]	30°	30°	30°	22.5°	22.5°
Max. Úroveň přesít'ování [-]	7	7	6	10	12
Max. velikost elementu[mm]	40.0	20.0	10.0	2.0	1.0
Min. velikost elementu [mm]	0.31	0.16	0.16	0.00	0.00
Počet vstupních elementů	8	29	114	2830	11317
Velikost simulace [MB]	42.134	42.139	45.027	49.894	70.804

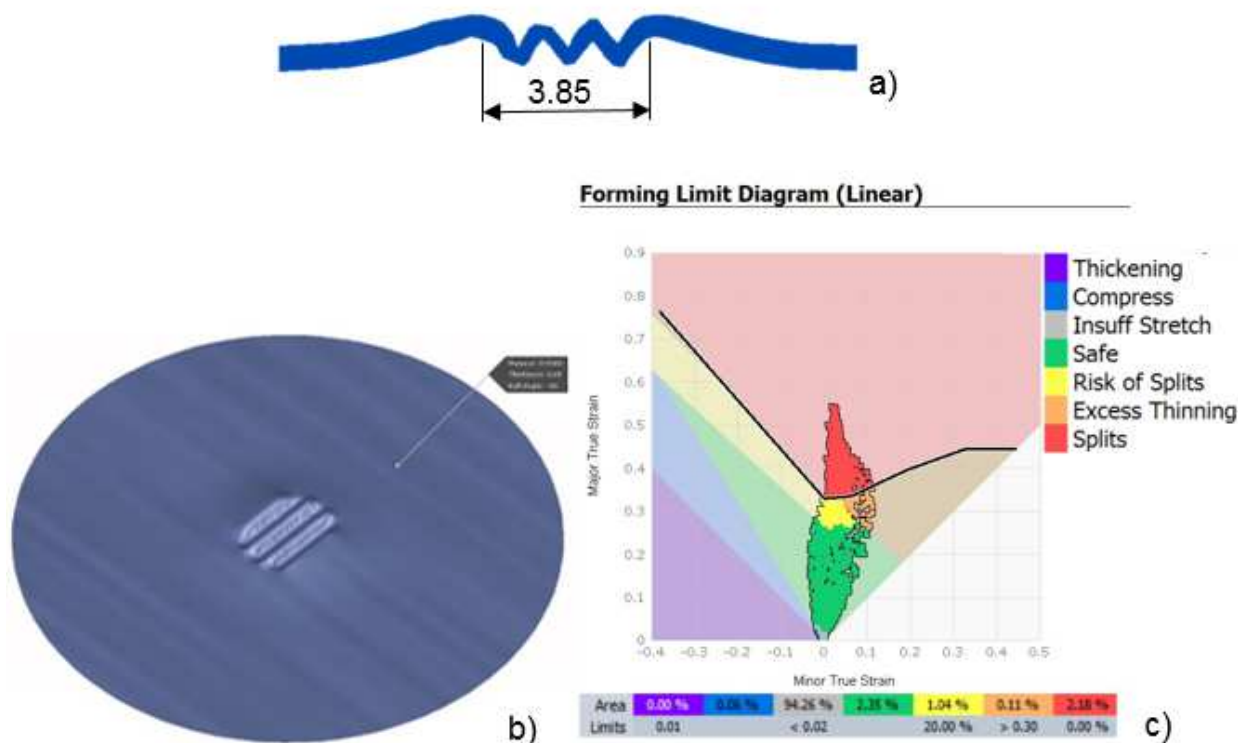
Na základě porovnání simulačních výsledků, kde byly využity nástroje s originálními rozměry, je zřejmé, že software Autoform Forming má obtíže s přesným výpočtem numerické simulace pro strategie CE a CE+. Na Obr. 8.38 je jasně vidět, že kvalita výstupu simulace není optimální. Kvalita výsledku je přímo ovlivněna zvolenými parametry výpočtu simulace. Elementy konečnoprvkové sítě jsou příliš velké i po automatickém přesíťování a dochází k penetraci nástrojů do plechu materiálu. Penetrace nástroje do plechu je zobrazena na Obr. 8.40. [P6]



Obr. 8.40 - Pohled v řezu výstupem simulace strategie CE společně s nástrojem (funkční části nástroje jsou barevně odlišeny) [P6]

Výsledky simulačních smyček, kde byly zvoleny zbylé strategie výpočetních parametrů dávají lepší výsledky. Vyražený drážkový profil je již jasně zřetelný, ale i zde je možné sledovat rozdílnou kvalitu výsledků mezi jednotlivými strategiemi. [P6]

Lze konstatovat, že i přes další zpřesňující nastavení výsledky simulací stále nejsou optimální, ačkoliv se drážky určené k fixaci lemového spoje z grafického hlediska jeví relativně dobře (Obr. 8.41), při bližším prozkoumání výsledků, konkrétně FLD diagramu, je výsledek však stále neuspokojivý. [P6]



Obr. 8.41 – Nejlepší výsledek simulace -strategie UD₂ (a – šířka profilu v mm; b – izometrický pohled na výsledek; c – FLD diagram) [P5]

Pokud by byl tento výsledek simulace považován jako konečný, tak by to uživatele s největší pravděpodobností vedlo k závěru, že není možné takový drážkový profil vyrobit, protože na základě analýzy FLD diagramu této simulace, je patrné, že bude docházet k porušení materiálu v místech vrcholů drážkování. [P5]

Lze konstatovat, že pokračování experimentu simulací, kde jsou uvažovány originální rozměry navržených nástrojů a tloušťky materiálu, nemá další význam, jelikož simulace nebude disponovat vypovídajícími výsledky, podle kterých by se dalo pokračovat nadále v praxi.

Nicméně jak již bylo několikrát zmíněno, software AutoForm je používán především pro simulace v automobilovém průmyslu, při výrobě karosářských dílů automobilu. Ostrá geometrie a malé rozměry nástroje na výrobu drážek jsou pro daný software příliš náročné. Právě proto, výsledky simulací drážek fixace nejsou uspokojivé, kdy se simulovaný díl chová jako zmetkovitý a to i přes tu skutečnost, že u reálných experimentálních vzorků, které již byly vyhotoveny dříve, k porušení materiálu nedocházelo. Proto je nutné zvolit jinou metodu pro návrh metodiky numerických simulací mechanické fixace lemových spojů a je nutné na tuto problematiku zaměřit z více obecného hlediska, které je popsáno dále v textu. [P5]

Plastická deformace, jeden ze základních předpokladů pro tváření plechů, je charakterizována specifickými mechanismy a zákony. Jiný způsob řešení pro návrh metodiky numerických simulací pro mechanickou fixaci lemových spojů je možný při aplikaci jednoho ze základních zákonů plastické deformace, konkrétně „Zákon podobnosti“. [P5]

8.6.1 Zákon podobnosti a jeho aplikace

Při plastické deformaci dvou těles, která splňují podmínky geometrické, mechanické a fyzikální podobnosti, platí: poměr deformačních sil je roven třetí mocnině poměru lineárních rozměrů, poměr deformačních sil je roven druhé mocnině poměru lineárních rozměrů, měrný deformační odpor (měrný tlak) je shodný. [29] [P5]

Matematické vyjádření zákona podobnosti:

$$\frac{A_1}{A_2} = \frac{V_1}{V_2} = a^3 \quad (8)$$

Kde: A_1 – deformační práce u prvního tělesa, A_2 – deformační práce u druhého tělesa, V_1 – objem prvního tělesa, V_2 – objem druhého tělesa, a – lineární rozměr tělesa [20]

$$\frac{F_1}{F_2} = \frac{S_1}{S_2} = a^2 \quad (9)$$

Kde: F_1 – deformační síla u prvního tělesa, F_2 – deformační síla u druhého tělesa, S_1 – plocha prvního tělesa, S_2 – plocha druhého tělesa, a – lineární rozměr tělesa [29]

Geometrická podobnost:

- Poměr objemů je roven třetí mocnině poměrů lineárních rozměrů

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} = a \cdot a \cdot a = a^3, \quad (10)$$

Kde: V_1 – objem prvního tělesa, V_2 – objem druhého tělesa, h_1 – výška prvního tělesa, h_2 – výška druhého tělesa, b_1 – šířka prvního tělesa, b_2 – šířka druhého tělesa, l_1 – délka prvního tělesa, l_2 – délka druhého tělesa, a – lineární rozměr tělesa [29]

- Poměr ploch je roven druhé mocnině poměrů lineárních rozměrů

$$\frac{S_1}{S_2} = \frac{h_1}{h_2} \cdot \frac{b_1}{b_2} = a \cdot a = a^2, \quad (11)$$

Kde: S_1 – plocha prvního tělesa, S_2 – plocha druhého tělesa, h_1 – výška prvního tělesa, h_2 – výška druhého tělesa, b_1 – šířka prvního tělesa, b_2 – šířka druhého tělesa, a – lineární rozměr tělesa

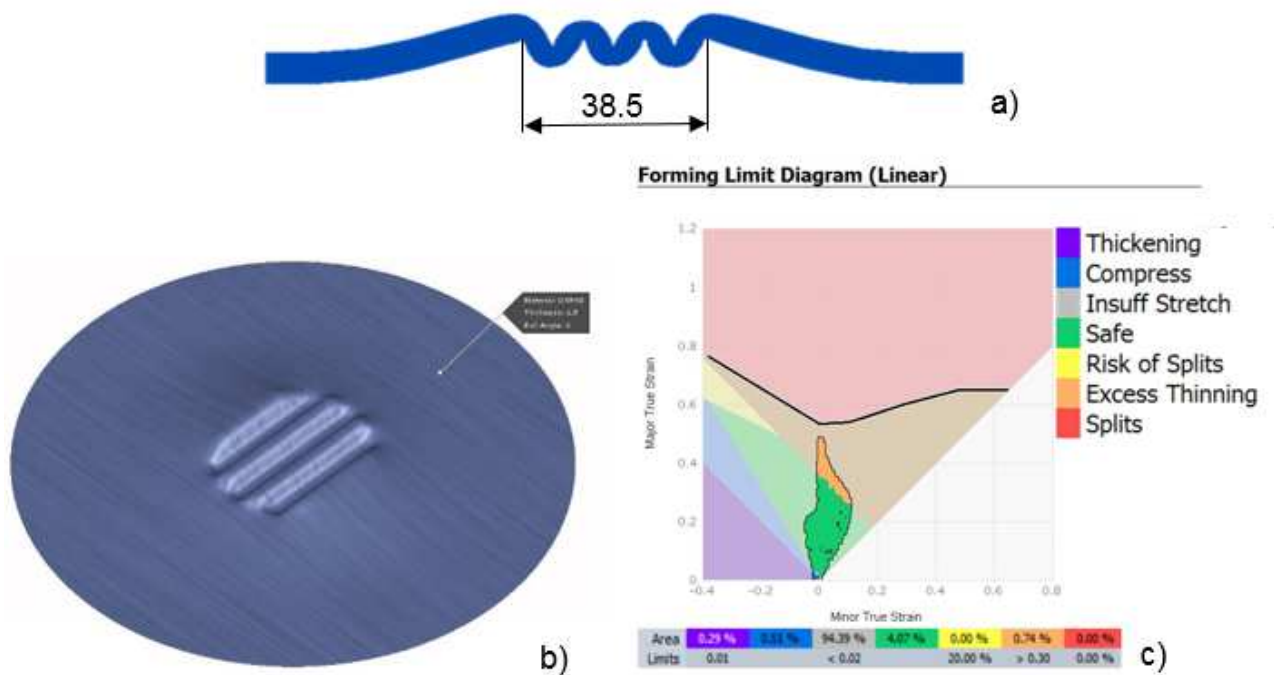
Mechanická podobnost: [29]

- Stálost poměru odpovídajících sil ke čtverci rozměrů i rovnost odpovídajících měrných tlaků
- Stejnou velikost koeficientu tření na dotykových plochách
- Stejnou velikost a směry hlavních os napětí v odpovídajících bodech srovnávaných těles

Fyzikální podobnost: [29]

- Stejně chemické složení, struktura a fázový stav srovnávaných těles
- Stejná deformační rychlost
- Stejná teplota při deformaci tělesa
- Podobně rozložená napětí ve srovnávaných tělesech

Pro aplikaci zákona podobnosti je nutné upravit vstupní parametry numerické simulace, v případě zachování geometrické podobnosti se jedná o zvětšení originálních rozměrů nástrojů poměrem 10:1, a dále je nutné uvažovat s tloušťkou plechu využitého pro simulaci 6,5 mm. Níže jsou zobrazeny výsledky při využití základního nastavení strategie FV (Final Validation). [P5]



Obr. 8.42 – Výsledek simulace po aplikaci zákona podobnosti a při využití strategie FV (a – šířka profilu v mm; b – izometrický pohled na výsledek; c – FLD diagram) [P5]

Výsledky numerické simulace tvorby drážek fixace, kde je aplikován zákon podobnosti, tedy originální rozměry jsou zvětšeny poměrem 10:1, prokazují správnost předem vyslovené hypotézy. Simulační software po úpravě vstupujících dat a při zachování stejného nastavení vykazuje přesnější výsledky v porovnání s numerickou simulací, kde jsou použity originální rozměry. Jak je zřejmé z FLD diagramu (Obr. 8.42), tak trend diagramu je stejný s předchozím, ovšem v tomto případě, již nedochází k porušení materiálu. Díky použití zvětšených rozměrů, je software schopen přesněji definovat a charakterizovat průběh tváření fixačních drážek s ostrou geometrií. [P5]

Na Obr. 8.43 jsou zobrazeny fotografie reálného vzorku s malými rozměry. Pohledové srovnání reálných vzorků drážkového profilu s výsledky simulace, kde byl aplikován Zákon podobnosti, jasně prokazuje správnost a přínos takového řešení.



Obr. 8.43 - Experimentální vzorek drážkování [P5]

Na základě potvrzení hypotézy je možné dále pokračovat v numerických simulacích za využití aplikace zákona podobnosti a rozvíjet metodiku pro aplikaci v reálné výrobě.

Z výše uvedeného vyplývá, že pro kompletní simulaci lemování s využitím mechanické drážkové fixace lemu bude aplikován zákon podobnosti, tudíž je nutné veškeré vstupující prvky – tvářecí nástroje, zvětšit příslušným poměrem, který je v tomto případě 10:1.

Po tomto kroku je potřeba připravit k výpočtu kompletní simulaci v jednotlivých krocích takto (viz obr. 8.44):

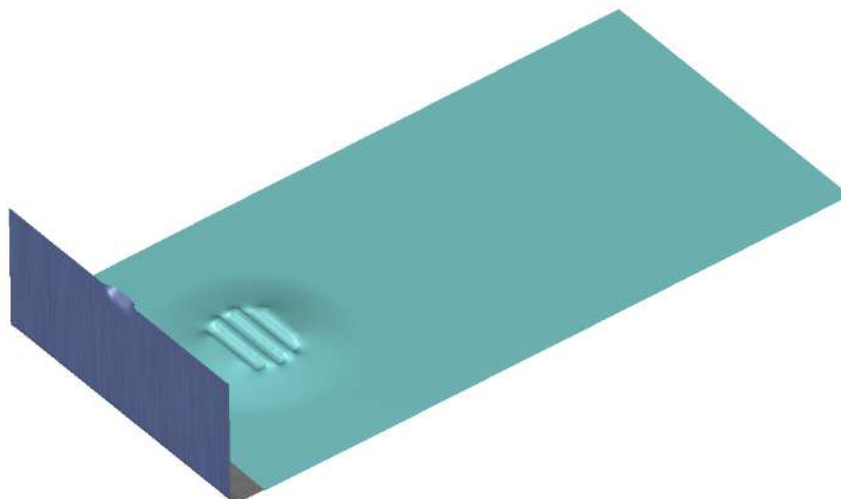


Obr. 8.44 - Zjednodušená metoda simulace [P6]

První krok se tedy zabývá ražením drážkového profilu na vnitřní plech pro lemový spoj. To zahrnuje i export výsledku v příslušném formátu (*.asm), který bude použit pro simulaci lemování.

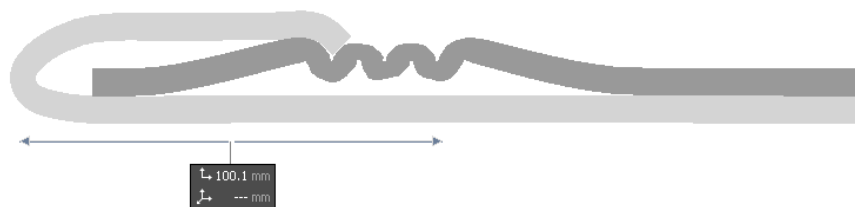
Druhý krok se týká simulace ohybu stojiny plechu vnějšího dílu o 90°, na který se ve třetím kroku razí speciální výstupek. I v tomto případě je možné exportovat výsledek ve speciálním formátu (*.asm) nebo pro poslední operaci je možná pokračovat ve stejném projektu/souboru simulace. V případě, že je zvolen export výsledku, je nutné pro poslední operaci lemování vytvořit nový simulační projekt.

Ve třetím kroku probíhá ražení háčku na stojinu vnějšího plechu. Ve čtvrtém kroku je nutné zadefinovat a vypočítat simulaci samotného konvenčního lemování pomocí 2 lemovacích vložek. Na obrázku č. 8.45 je zobrazena sestava vnitřního a vnějšího dílu připravená k výpočtu lemování.



Obr. 8.45 – Sesazení vnitřního plechu a vnějšího plechu pro lemování [P6]

Samotný výsledek simulace lemování s drážkovou fixací v softwaru AutoForm Forming je zobrazen na Obr. 8.46. Výsledek je zobrazen jako pohled v řezu, kde výstupek na stojině plechu “zapadl” do první drážky. Pohled řezem reálného dílu je dale vidět na Obr. 8.47. I v tomto případě fixace probíhá na první drážce profilu. [P6]



Obr. 8.46 – Pohled v řezu simulačním výsledkem po aplikaci zákona podobnosti [P6]



Obr. 8.47 – Pohled v řezu reálným vzorkem (tl. plechů 0,65mm) [P6]

Simulační výsledky a jejich porovnání s reálnými zkušebními vzorky potvrzují, že využití zákona podobnosti pro kompletní proces lemování v softwaru AutoForm Forming je použitelné. Jako další krok je tedy navrženou metodiku ověřit pomocí komplexní simulace

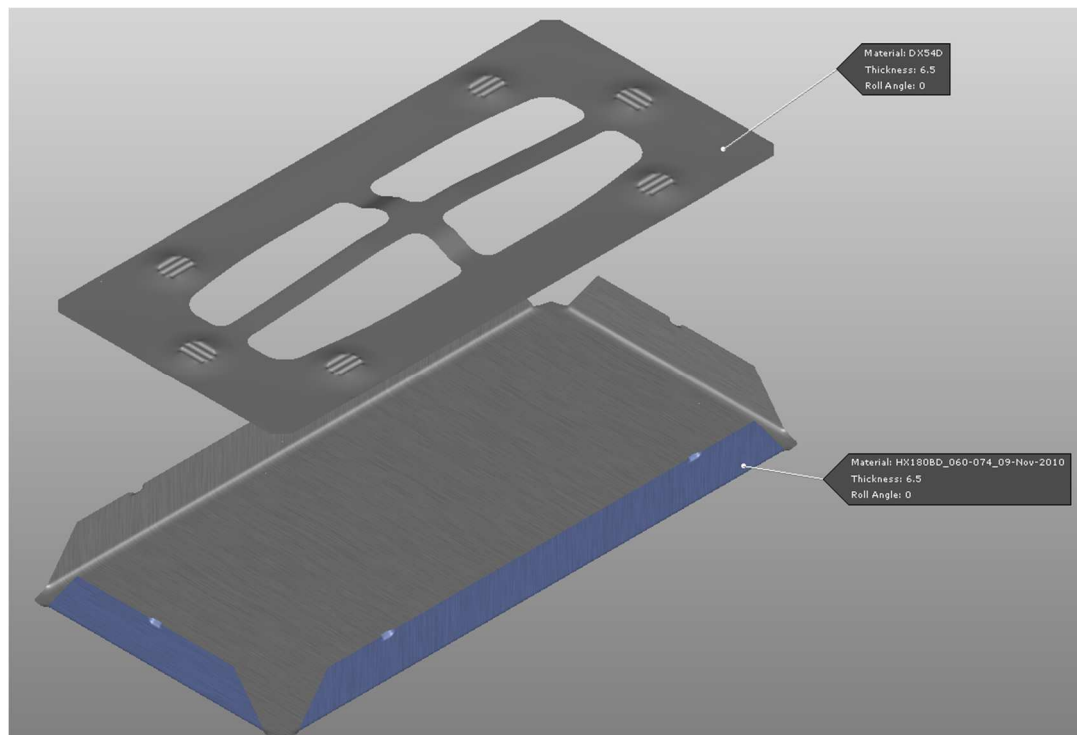
lemování, kde budou fixační prvky umístěny v několika pozicích podél celého obvodu dílu. [P6]

Předpokladem pro nastavení komplexní simulace lemování je úspěšná simulace předchozích tvářecích operací vnějšího a vnitřního dílu. Takto připravené díly jsou následně dále využity pro samotnou numerickou simulaci lemování. Nebo alespoň je nutné disponovat referenčními CAD daty pro vnitřní a vnější díl. Simulace lemování v programu AutoForm Forming je totiž možné definovat pomocí dvou přístupů:

1. Rychlé lemování – využití CAD dat bez deformační historie, většinou pro rychlé ověření vyrobiteľnosti
2. Pokročilé lemování – využití (*.asm) souborů (exportovaných výsledků simulací), data zahrnují veškerou deformační historii a výsledky z předchozích operací

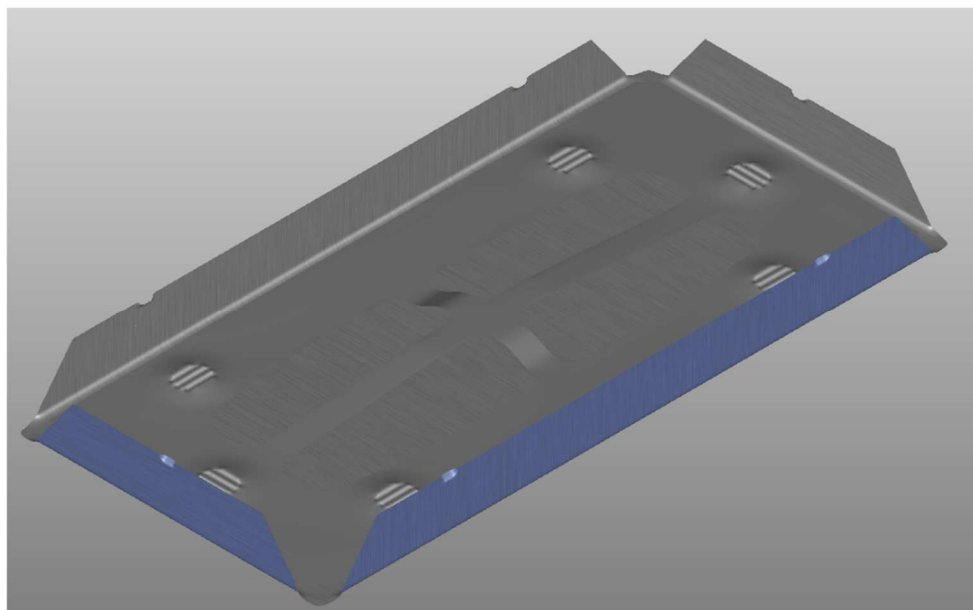
Na základě navržené metodiky procesu numerické simulace jsou níže uvedeny některé výsledky z procesu mechanické fixace lemu drážkovým způsobem v simulačním softwaru AutoForm Forming.

V první fázi simulace dochází k umístění vnitřního dílu s drážkami do vycentrované polohy vůči dílu vnějšímu. Výstup simulace po prvním kroku je zobrazen níže, včetně základních informací o jednotlivých dílech.



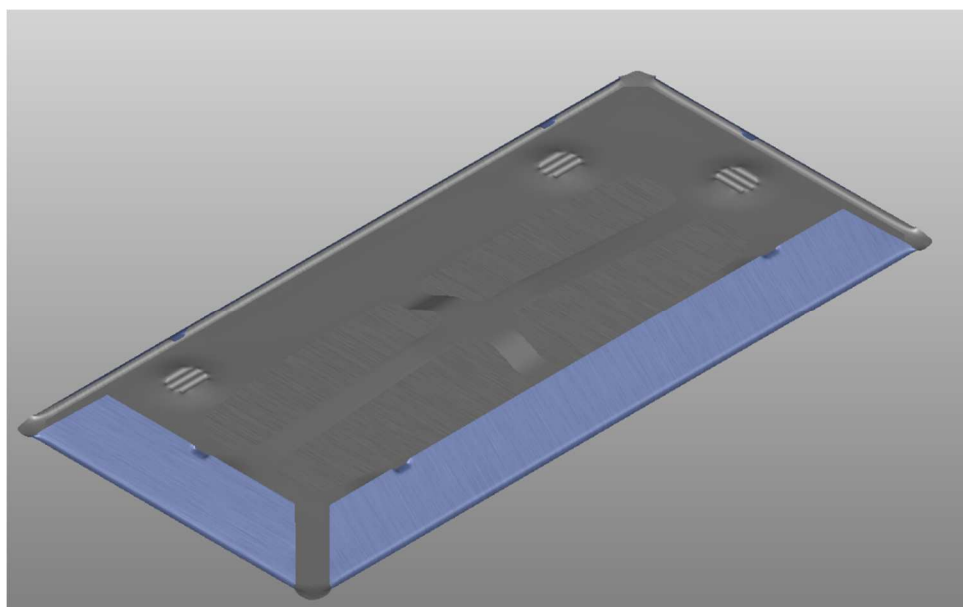
Obr. 8.48 - Vycentrování dílů [P12]

V druhém kroku probíhá sestavení dílů do finální polohy, kdy je vnitřní díl s drážkami umístěn na vnější díl. Takto sestavené díly jsou připraveny pro lemování.

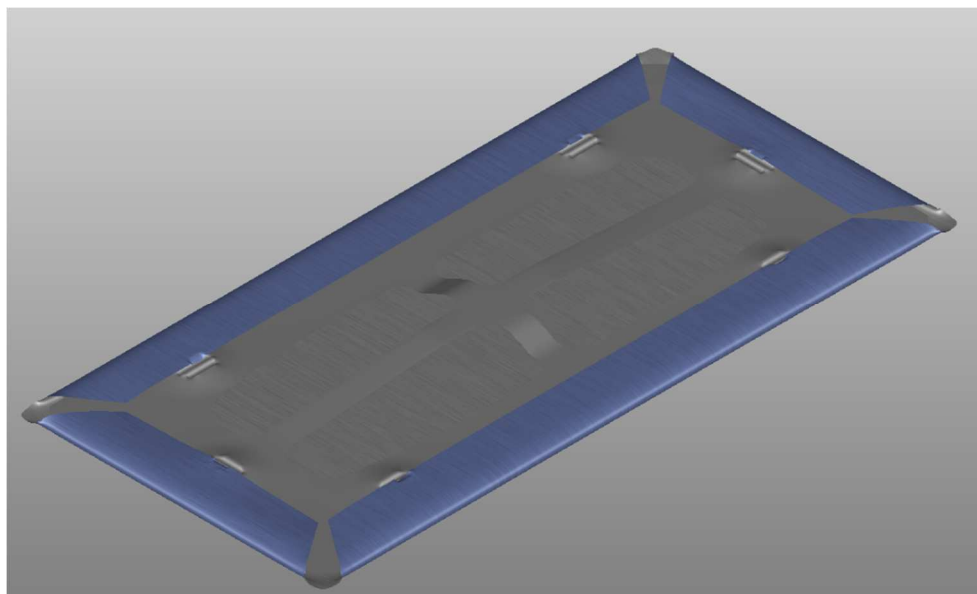


Obr. 8.49 - Sestavení dílů [P12]

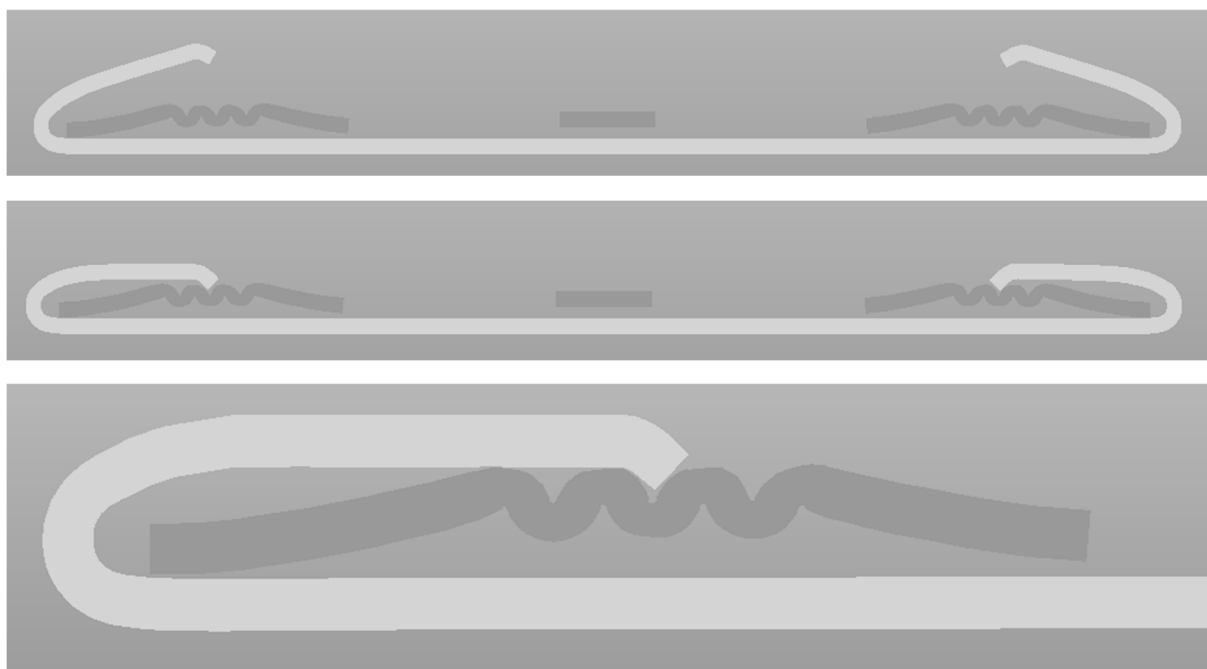
V poslední fázi probíhá již samotná simulace lemování, v tomto případě se jedná o konvenční lemování, které je rozděleno do několika kroků v podobě předlemování a samotného lemování, případně dolemování. Jednotlivé obrázky ze simulace lemování, včetně jednotlivých detailů jsou zobrazeny níže (Obr. 8.50 - 8.52).



Obr. 8.50 – Předlemování [P12]



Obr. 8.51 – Dolemování [P12]



Obr. 8.52 - Detaily fixačního bodu v průběhu numerické simulace [P12]

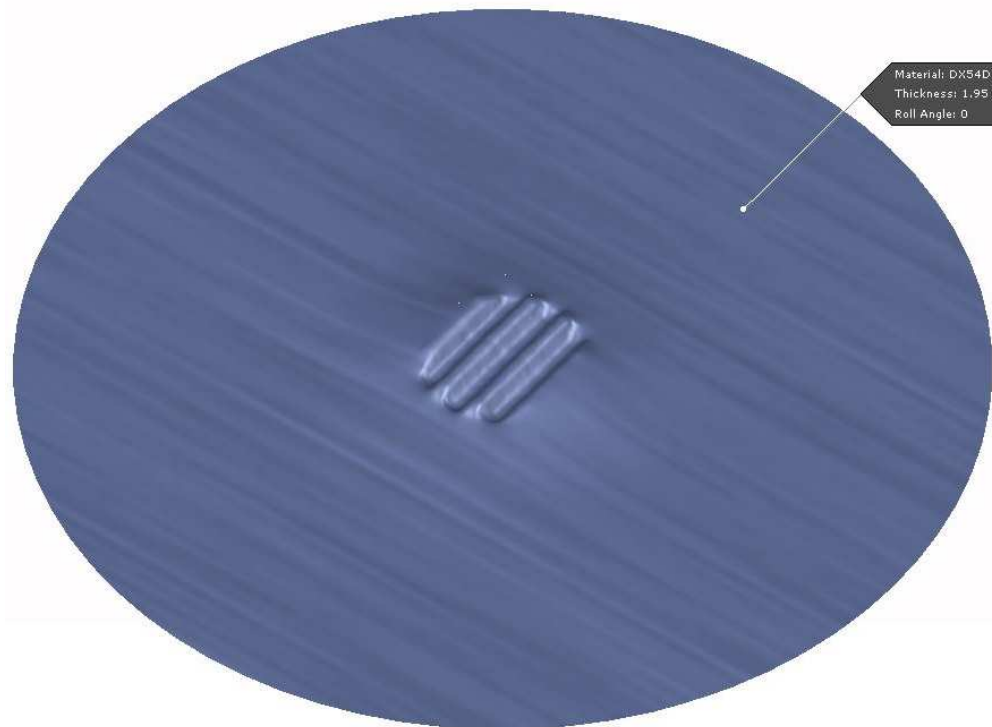
Z experimentální simulace lemování, kde je implementována drážková fixace lemu, se potvrzuje a ověřuje možnost využití navržené metodiky. Na virtuálním experimentálním dílu byl aplikován zákon podobnosti a veškeré rozměry nástrojů, včetně tloušťky materiálu byly zvětšeny poměrem 10:1.

Výsledky ze simulace jsou příznivé, ovšem bylo zjištěno, že simulační software AutoForm Forming plní svoji funkci správně do určitého limitu. Tímto limitem je omezení velikosti vkládaného polotovaru plechu. Simulační software je schopen efektivně řešit úlohy

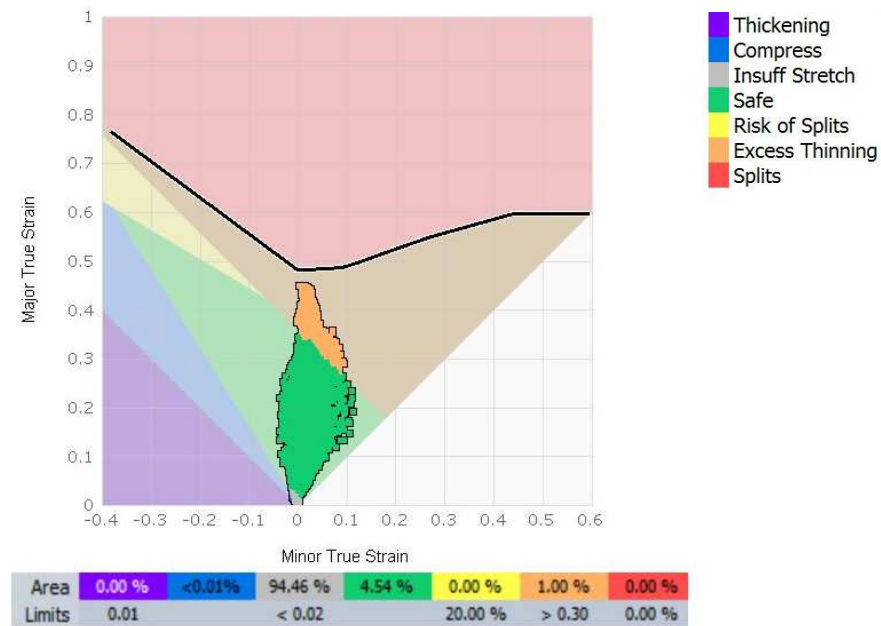
při velikosti polotovaru do 10000 mm x 10000 mm. Pro tento způsob řešení to znamená, že využití této metodiky pro simulace velikých panelových dílů, při zachování poměru 10:1, není možné. Například motorové kapoty automobilů spadající do střední třídy a výše, by při aplikaci zákona podobnosti s využitím poměru 10:1 nebylo možné efektivně řešit. [P12]

Z výše uvedeného vyplývá, že je nutné pro aplikaci zákona podobnosti nalézt takový poměr zvětšení, kdy výsledky simulace budou stále přesné a využitelné, při snaze využití takových rozměrů, které se nejvíce blíží rozměrům originálním. [P12]

Následující numerická simulace tváření drážek fixace splňuje výše zmíněné podmínky. Tentokrát byl využit poměr zvětšení 3:1. I při tomto zvětšujícím poměru jsou výsledky velmi příznivé, a jsou zřetelné z Obr. 8.53 a 8.54 níže.



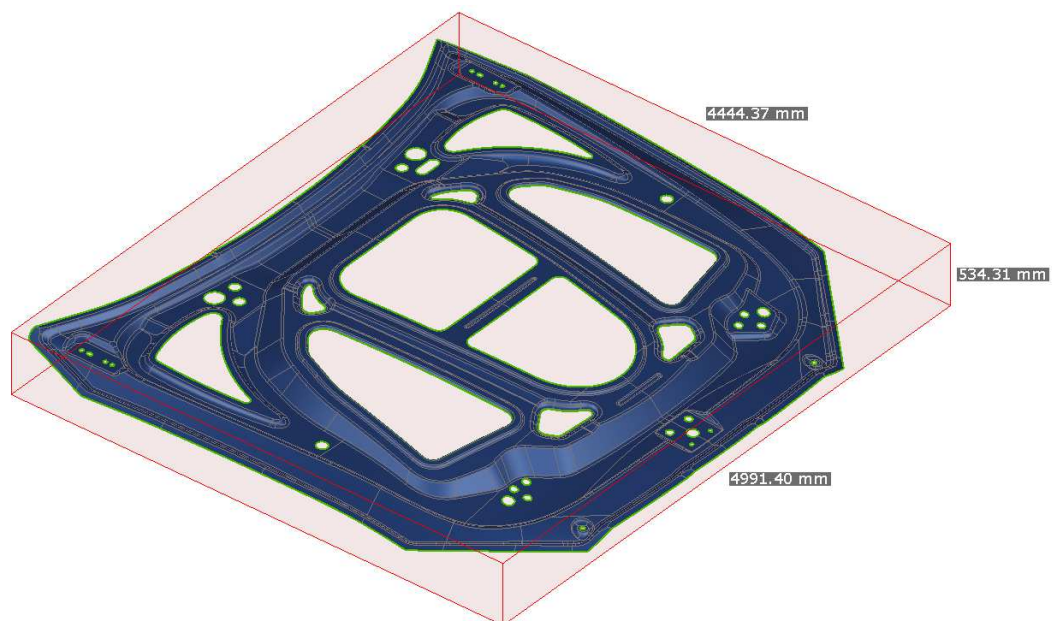
Obr. 8.53 – Simulace po aplikaci zákona podobnosti, měřítko 3:1 [P12]



Obr. 8.54 – FLD diagram

Pro ověření aplikovatelnosti metody na díl motorové kapoty, která spadá do kategorie střední velikosti a výše, byly připraveny další simulace v softwaru AutoForm Forming.

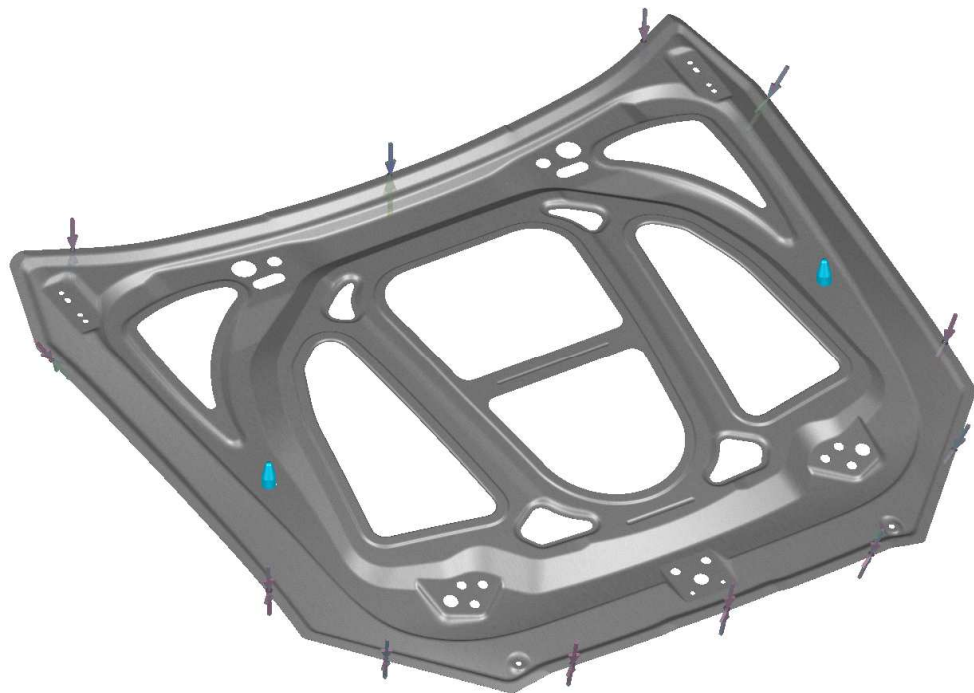
CAD model vnitřního dílu kapoty automobilu, který je vyobrazen, byl v softwaru CATIA zvětšen v měřítku 3:1. Tento díl byl následně uložen ve formátu *.igs a dále byl tento díl využit v softwaru AutoForm Forming, kde byla nastavena a vypočítána simulace ražení fixačních drážek.



Obr. 8.55 - CAD model vnitřního dílu kapoty v měřítku 3:1

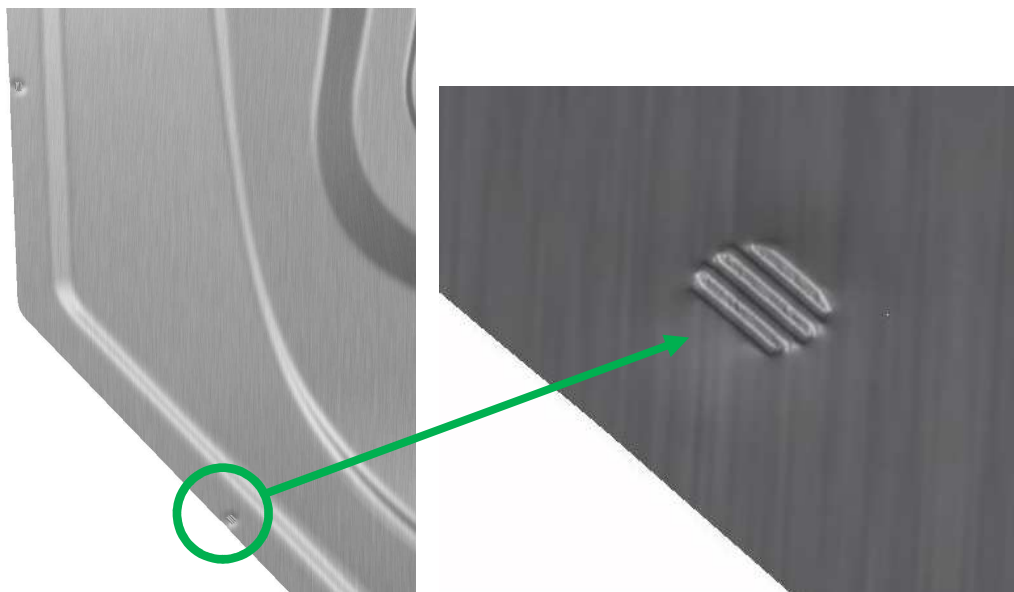
Ocelové plechy, které se běžně používají na panelové díly karoserie automobilu mají tloušťku okolo hodnoty 0,7 mm. U tohoto dílu je považována originální tloušťka plechu DX54D 0,65 mm. Při samotné simulaci a aplikaci dříve zmíněného zákona o podobnosti, je tloušťka virtuálního plechu 1,95 mm, tzn. celkové rozměry jsou zvětšeny v poměru 3:1.

Na Obr. 8.56 jsou znázorněny pozice fixačních drážek na vnitřním dílu a dále i směry pohybu nástrojů pro jednotlivé drážky. Směry pohybu nástroje vždy odpovídají směru normály od plochy dílu v daném místě. Na simulovaném vnitřním dílu motorové kapoty je tedy dohromady **12 fixačních bodů**. Tento počet je pro tuto simulaci volen tak, aby se simulace opět co nejvíce přiblížila reálným podmínkám a požadavkům pro drážkovou fixaci lemového spoje. Na tomto simulovaném díle byl volen polotovar s úhlem válcování 45°, a to z důvodu různé orientace drážkování (vodorovné/svislé/šikmé), které musí vždy korespondovat v dané pozici s orientací okraje plechu, proto je nutné uvažovat možné ovlivnění tváření drážek s ohledem na směr vláken struktury plechu. [P12]

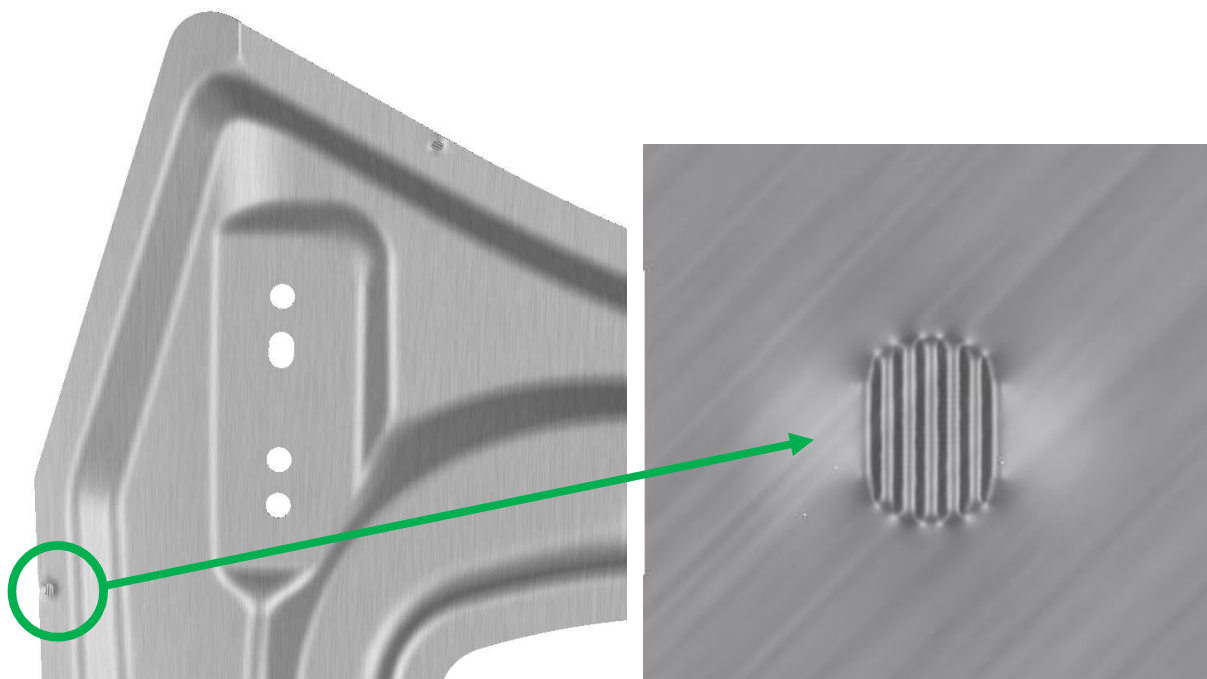


Obr. 8.56 - Pozice drážek na vnitřním díle kapoty [P12]

Detailní vyobrazení drážek po dokončené simulaci je na Obr 8.57 a na Obr 8.58. Jak je patrné, tak i při poměru 3:1 je dosaženo kvalitního výsledku, který může být následně využit pro kompletní simulaci lemování. [P12]



Obr. 8.57 – Drážkový profil na vnitřním díle kapoty



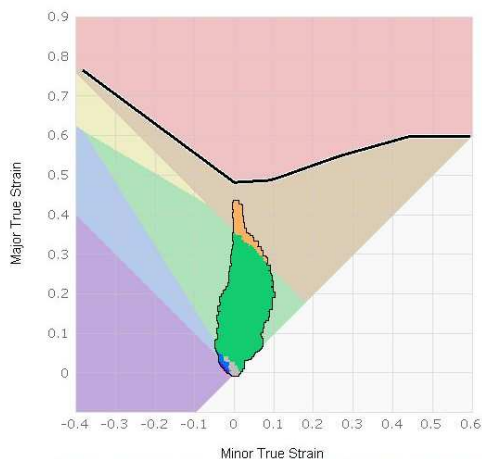
Obr. 8.58 - Drážkový profil na vnitřním díle kapoty [P12]

Kvalitní výsledek simulace prokazuje zároveň i pohled v řezu jedné pozice, který je možné vidět na Obr. 8.59 a k tomu korespondující FLD diagram (Obr. 8.60).



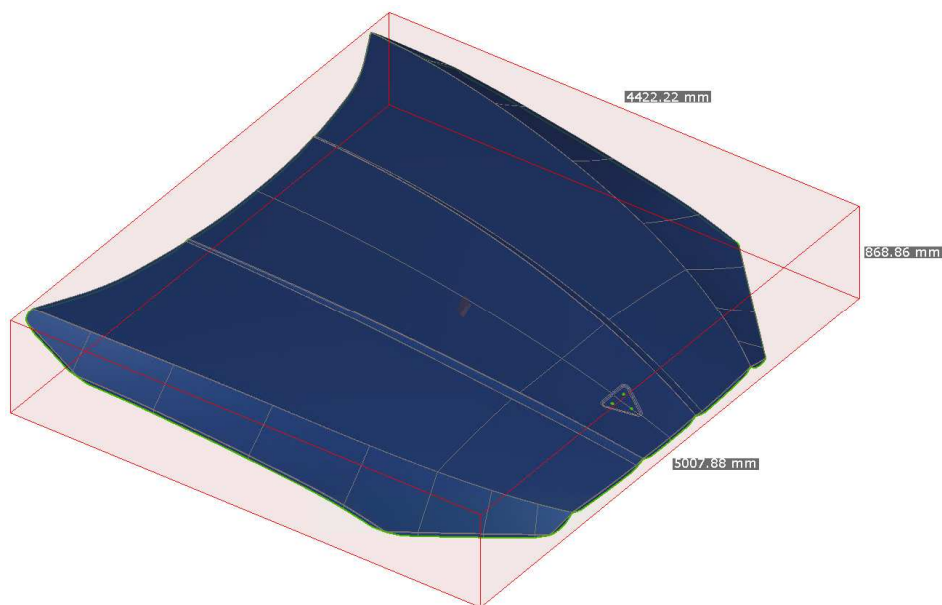
Obr. 8.59 - Detail drážkového profilu v řezu [P12]

Forming Limit Diagram (Linear)



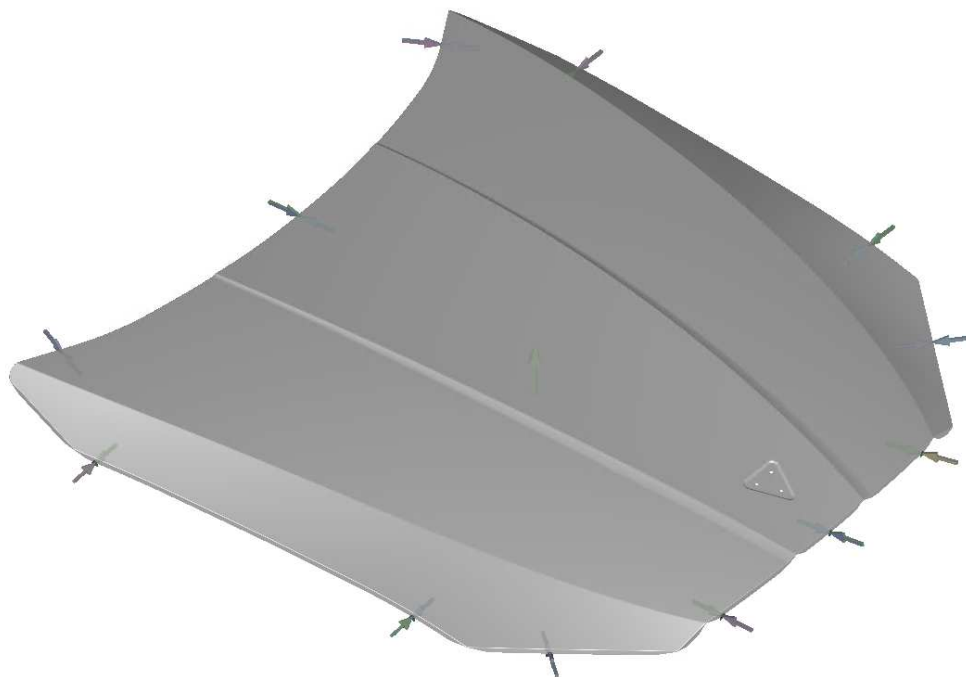
Obr. 8.60 - FLD diagram ražení drážek na vnitřní díl kapoty [P12]

U vnějšího pohledového dílu je uvažovaná originální tloušťka plechu HX180BH 0,65 mm. Při samotné simulaci a aplikaci dříve zmíněného zákona o podobnosti, je tloušťka virtuálního plechu 1,95 mm, tzn. že i v tomto případě jsou celkové rozměry zvětšeny v poměru 3:1. [P12]



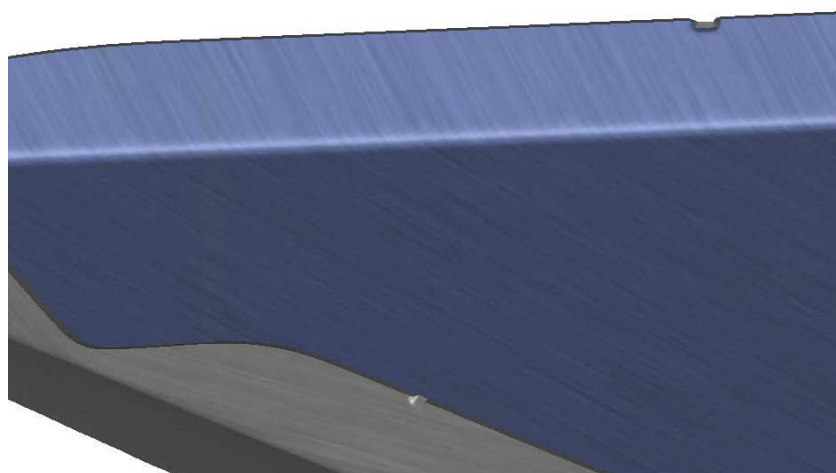
Obr. 8.61 - CAD model vnějšího dílu kapoty v měřítku 3:1 [P12]

Na Obr. 8.62 jsou zobrazeny pozice fixačních výstupků na stojině lemu vnějšího pohledového dílu přední kapoty automobilu. Počet a lokace těchto fixačních elementů - háčků přímo koresponduje s počtem a pozicemi drážek na vnitřním díle. Na simulovaném vnějším díle motorové kapoty je tedy dohromady **12 fixačních bodů**, vždy na hraně stojiny dílu. [P12]

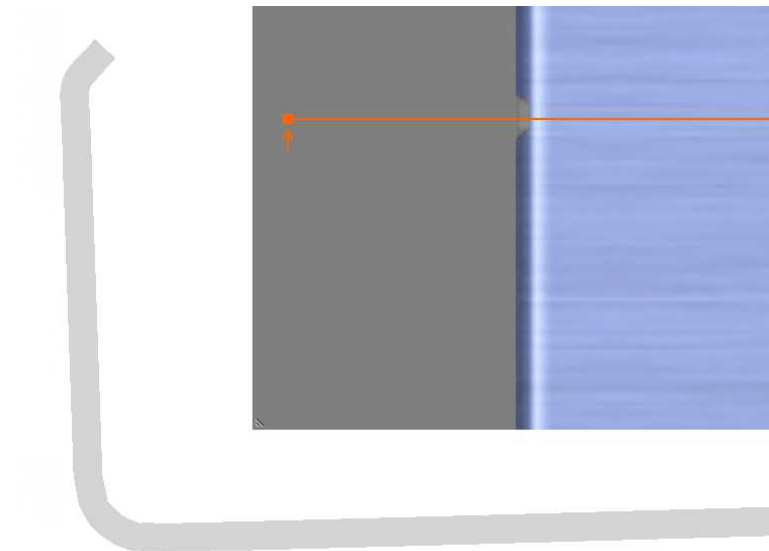


Obr. 8.62 - Pozice fixačních výstupků [P12]

Jednotlivé detailní pohledy na fixační výstupky jsou zobrazeny na Obr. 8.63 a 8.64. Po úspěšné simulaci ražení fixačních prvků na oba díly je tedy možné nastavit a vypočítat simulaci lemování.



Obr. 8.63 - Detail na háčky na stojině vnějšího dílu kapoty [P12]

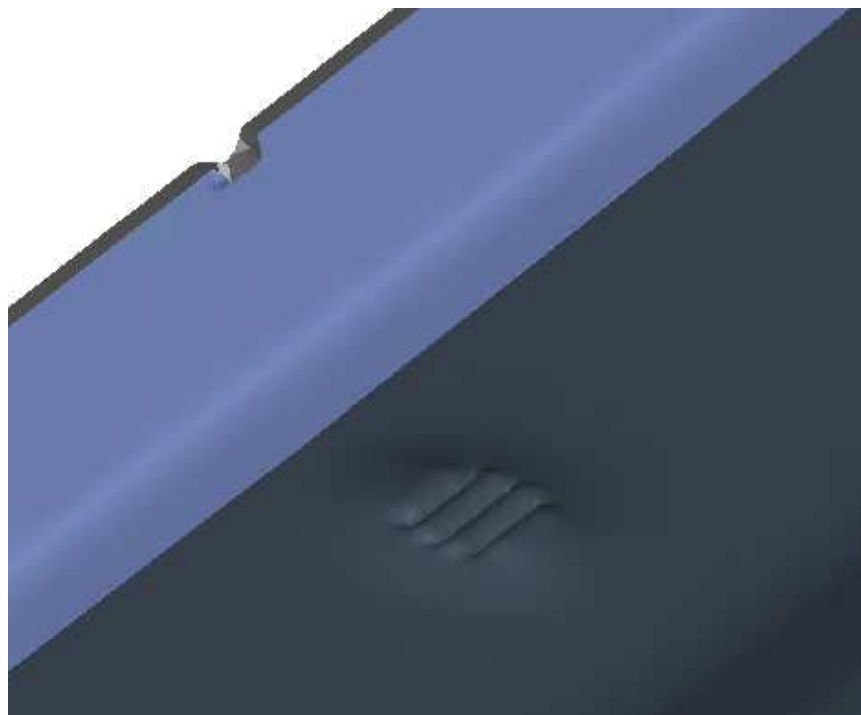


Obr. 8.64 - Detail řezem háčku na stojně vnějšího dílu kapoty [P12]

Samotná simulace lemování probíhá analogicky jako u předchozích experimentů a není tedy nutné již samotné nastavení v textu dále podrobněji rozvádět. Důležité jsou samotné výsledky simulace lemování a analýza jednotlivých fixačních bodů společně s vyhodnocením odpružení samotného dílu. Na Obr. 8.65 je zobrazena základní sestava kapoty po sesazení před lemováním a na Obr. 8.66 je detailní pohled na jednu z pozic drážkové fixace lemového spoje po sesazení před lemováním. [P12]



Obr. 8.65 - Sesazení vnějšího a vnitřního dílu pro lemování [P12]

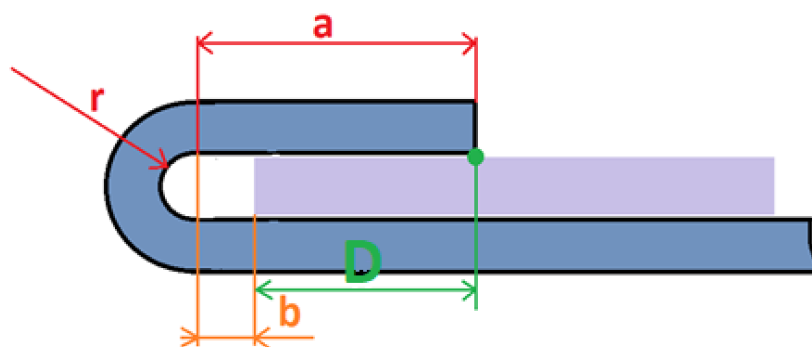


Obr. 8.66 - Detailní pohled na pozici drážkové fixace sesazených dílů před lemováním [P12]

Pozice drážek na vnitřním dílu musí vždy korespondovat s délkou lemované stojiny vnějšího dílu. Jen tak bude zajištěno správné vytvoření mechanického zámku. Pro komplexní panelový díl je nutné tento stav zkontrolovat, jelikož délka lemované stojiny se může po obvodu dílu měnit – nemusí být konstantní. Zjednodušeně lze správnou pozici drážkového profilu určit následovným postupem: [P12]

1. Kontrola rozměrů lemového spoje v místě mechanické fixace

Pro potřeby návrhu pozice drážkového profilu lze rozměry lemového spoje definovat dle Obr. 8.67.



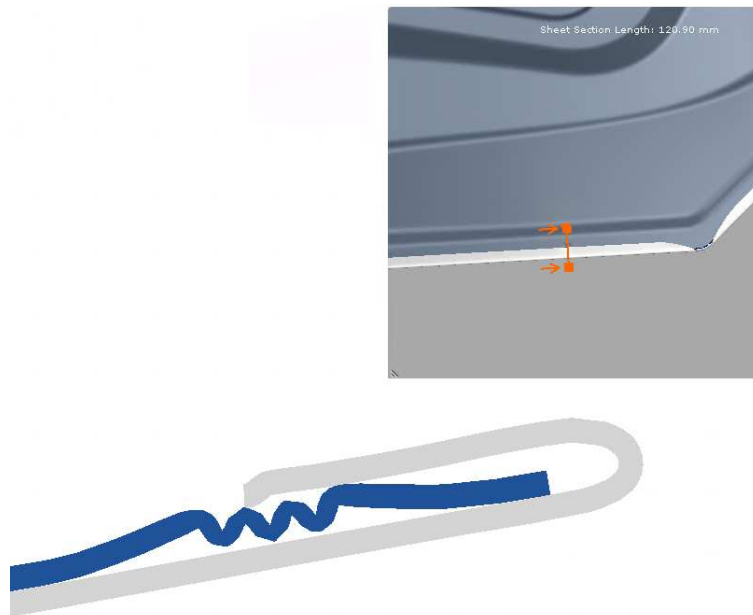
Obr. 8.67 – Rozměry lemového spoje pro určení pozice drážek

2. Výpočet pozice drážkového profilu z rozměrů předepsaného lemového spoje:

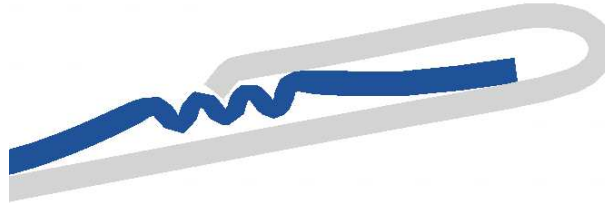
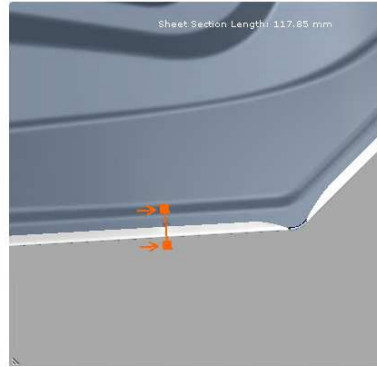
$$D = a - b \quad (12)$$

Kde: D – poloha středu drážkového profilu od hrany vnitřního plechu; a – délka předepsané stojiny lemu v zalemovaném stavu; b - předepsaná mezera mezi vnitřním dílem a začátkem vnitřního rádiusu lemového spoje

Na základě první simulační smyčky, kde byla poloha drážek na vnitřním díle určena pomocí jednoduchého výpočtu (12), je nutné překontrolovat stav vytvoření mechanických zámků. Pokud některé z formovaných háčků špatně zapadá do drážkového profilu, je nutné provést virtuální korekci pozic drážek. Na Obr. 8.68 je zobrazen příklad špatně vytvořeného mechanického zámku. Na Obr. 8.69 je zobrazen stejný mechanický zámek po virtuální korekci polohy drážkového profilu. [P12]



Obr. 8.68 - Špatně vytvořený mechanický spoj [P12]

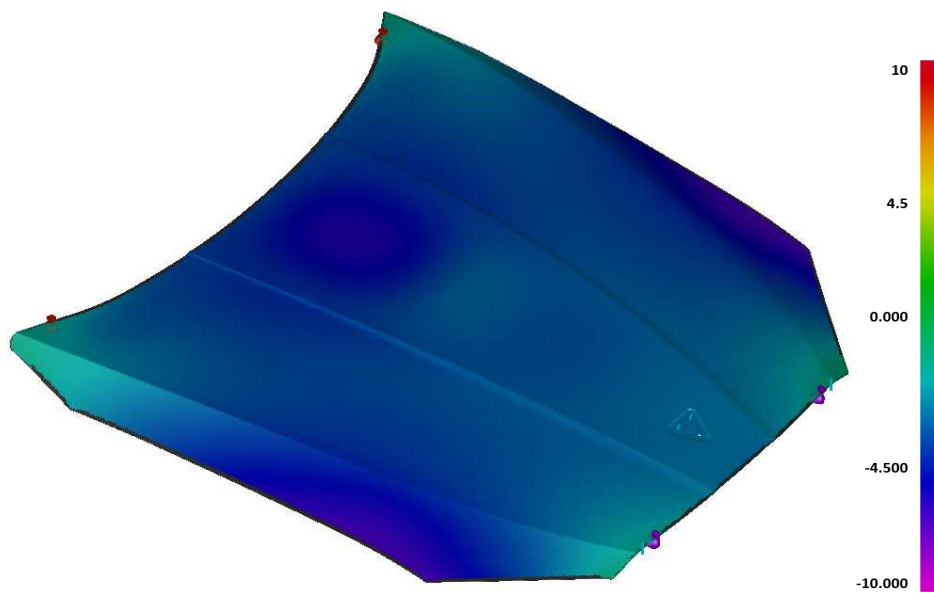


Obr. 8.69 – Spoj po virtuální korekci pozice drážek [P12]

Níže jsou tedy zobrazeny výsledky simulace po korekční smyčce (viz obr. 8.70 a 8.71). Pro vyhodnocení odpružení je nutné díl virtuálně ustavit do měřícího přípravku na tzv. RPS body. V těchto bodech je díl oboustranně upnut, jejich pozice odpovídá přímo pozicím na referenčním díle. Výsledek odpruženého dílu je zobrazen na Obr. 8.71. [P12]



Obr 8.70 – Výsledek simulace lemování [P12]



Obr. 8.71 - Výsledek analýzy odpružení [P12]

Analýza rozpružení je v tomto případě provedena z důvodu porovnání trendu výsledků simulací mezi softwary AutoForm Forming a AutoForm Assembly. Pokud je trend rozpružení mezi softwary stejný, tak lze konstatovat, že je možné využít oba softwary pro tuto problematiku.

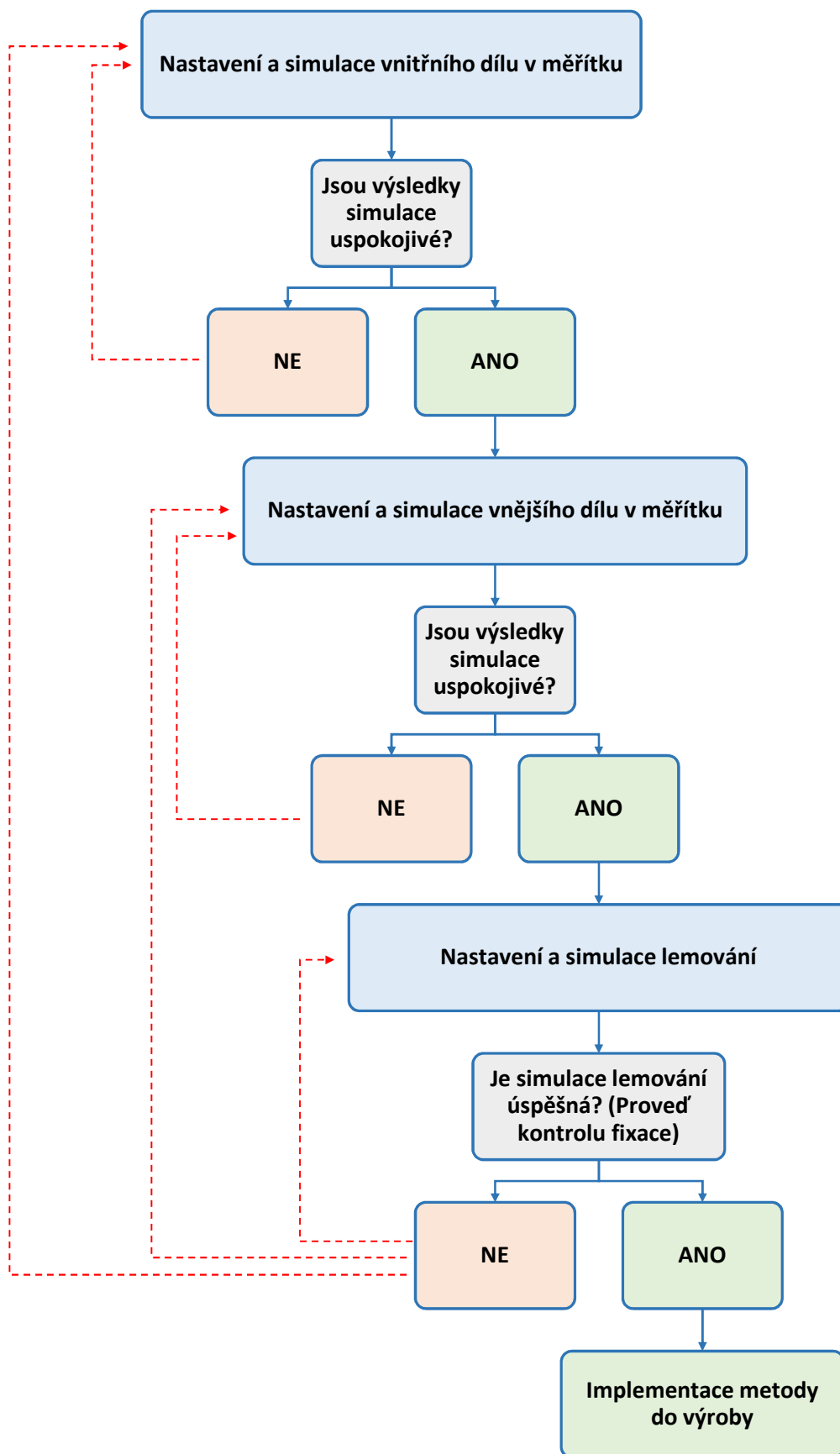
Na základě výsledku simulace lemování lze konstatovat, že software AutoForm Forming lze s omezením využít pro simulaci lemování s mechanickou fixací spoje. Vždy záleží na požadavcích konkrétního uživatele, zejména to v jaké kvalitě bude uživatel požadovat výsledky. [P12]

Nicméně v současné chvíli není možné efektivně simulovat drážkovou fixaci bez využití zákona podobnosti s ohledem na limity softwaru. Navržená geometrie elementů mechanické fixace lemového spoje je specifická svými malými rozměry a v originální formě toto nelze v softwaru simulovat. Nicméně po aplikaci zákona podobnosti lze problematiku efektivně řešit na bázi numerické simulace. [P12]

Pro celkové zjednodušení a zlepšení orientace lze celou metodiku drážkové fixace lemového spoje při využití zákona podobnosti shrnout do organizačního diagramu.

Organizační diagram je navržen tak, aby se co nejvíce zkrátila doba procesu kompletní simulace lemování k dosažení úspěšných výsledků. [P12]

8.6.2 Návrh organizačního diagramu práce pro software AutoForm Forming [P12]



8.7 Experiment simulace fixace s využitím SW AutoForm Assembly

Posledním experimentem disertační práce je simulace v novém softwaru AutoForm Assembly, který je od stejného developera, jako software AutoForm Forming.

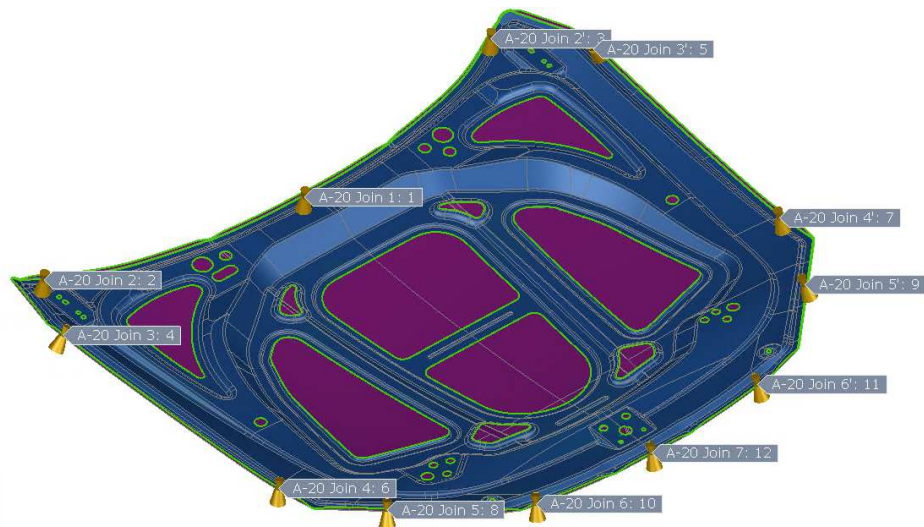
Jak již bylo uvedeno v kapitole „8.3.1 Přehled simulačních softwarů využívaných v experimentu disertační práce“. Software AutoForm Assembly slouží především pro simulace sestavení dílů karoserie automobilu do funkčních celků. AutoForm Assembly tedy nabízí uživateli simulovat nejčastější metody a technologie, které se využívají v oddělení svařoven výrobců automobilů.

V rámci posledního experimentu disertační práce je simulováno lemování kapoty, tedy stejného dílu jako v předchozím případě (viz kapitola 8.6) s tím rozdílem, že tento díl bude simulován jak ve svých originálních rozměrech (tedy bez aplikace zákona podobnosti), tak i po aplikaci zákona podobnosti, kde rozměry jsou navýšeny v poměru 3:1, stejně jak tomu bylo v předchozím experimentu v softwaru AutoForm Forming. [P13]

Tento přístup má své vlastní opodstatnění, hlavním důvodem je, že v AutoForm Assembly, je možné simulovat spojování dílu po lemování, konkrétně modul Assembly je designován i na metodu VarioPicker (viz kapitola 5.1.9), neboli metodu fixace lemového spoje ekvivalentem odporového svařování. Nicméně v modulu Assembly jsou veškeré metody spojování simulovány ve zjednodušené formě, tzn. v rámci numerické simulace je zadefinována lokace spoje bodem nebo křivkou a v definovaném místě dojde ke spojení detekovaných dílů. Pro případ fixace lemového spoje, když jsou nadefinovány body v místech fixace, software automaticky rozpozná, že se jedná o oblast lemového spoje a v rámci výpočtu simulace provede spojení pouze mezi zalemovanou stojinou vnějšího dílu a bližší plochou vnitřního dílu. Pohledová strana vnějšího dílu v simulaci zůstává netknutá – bez spojení. [P13]

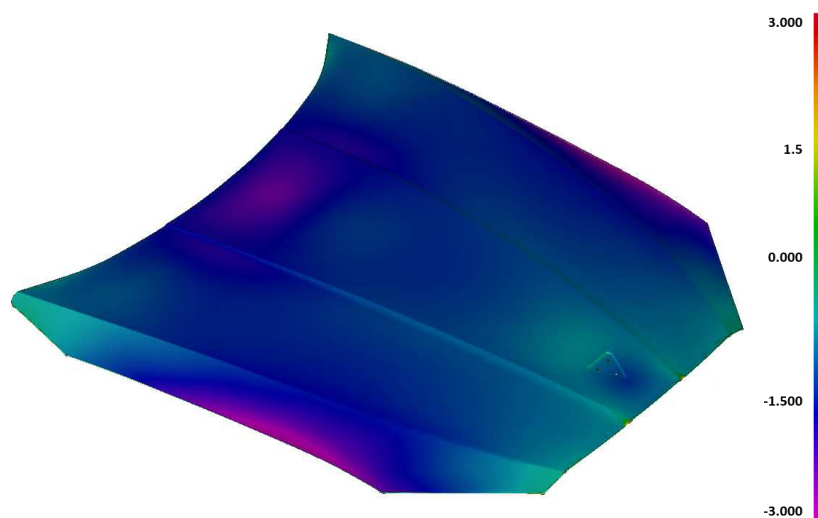
Velkým přínosem pro simulaci v softwaru AutoForm Assembly je i možnost implementace všech vnitřních dílů/výztuh panelového dílu. Díky tomu je možné obdržet výsledek, který se více přibližuje realitě a vytváří tak tzv. „digital twin“ – digitální dvojče. V rámci tohoto experimentu je však uvažováno pouze se základním vnitřním a vnějším dílem kapoty, aby bylo možné co nejpřesněji porovnat výsledky mezi softwarem AutoForm Forming a AutoForm Assembly. [P13]

Na obrázku níže (Obr. 8.72) jsou zobrazeny pozice virtuálních fixačních bodů lemového spoje. Takto zadefinovaná sestava, společně se zadefinovaným konceptem upnutí dílů sestavy pro tuto operaci, je připravena k výpočtu simulace.

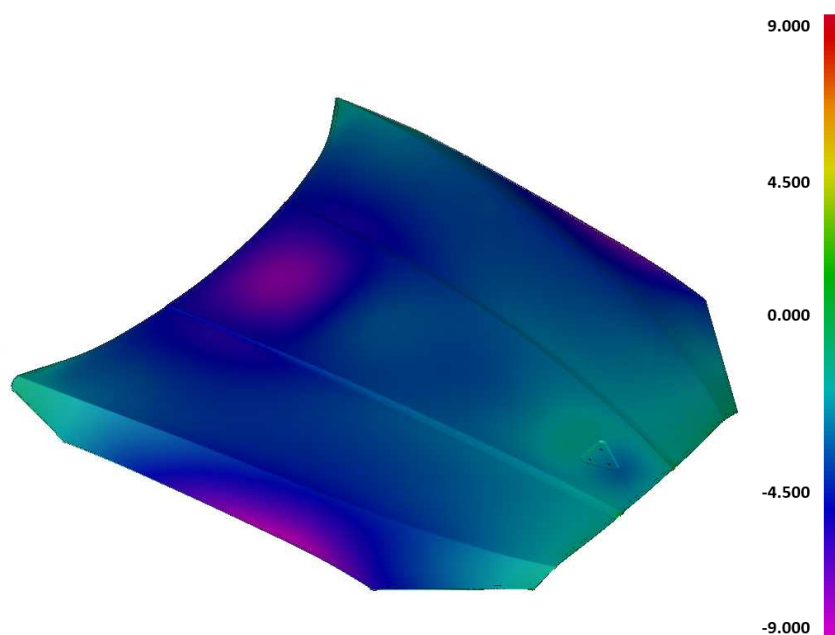


Obr. 8.72 – Pozice fixačních bodů v softwaru AutoForm Assembly

Níže jsou tedy výsledky ze simulací lemování přední kapoty automobilu, kde jsou definovány pozice mechanické drážkové fixace, která je také simulována v separátní operaci. Jedinou podmínkou tohoto procesu je zachování stejného upínacího konceptu sestavy pro operaci fixace, jaký byl použit v operaci lemování. Jelikož v softwaru AutoForm Assembly je operace fixace lemového spoje definována separátně a proto dojde mezi operacemi lemování a fixace k mezioperačnímu odpružení dílů. [P13]

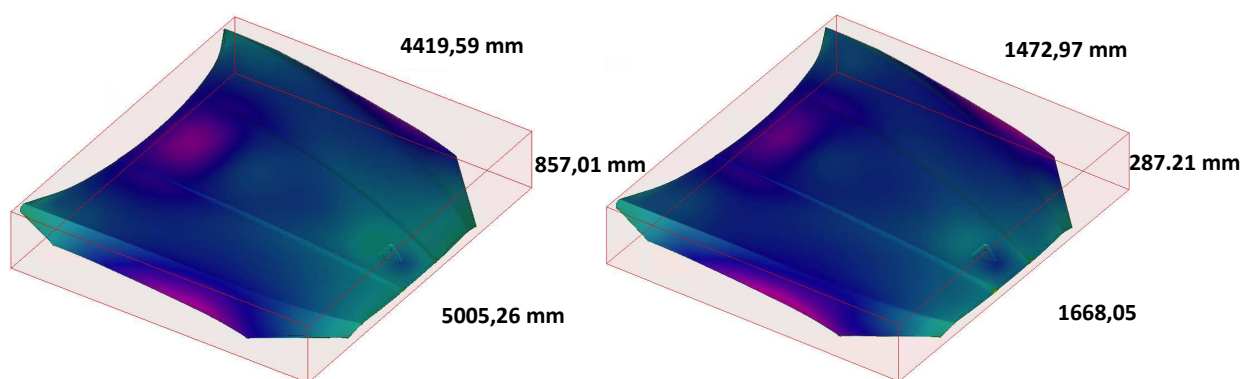


Obr. 8.73 – Výsledek odpružení sestavy 1:1 [P13]



Obr. 8.74 – Výsledek odpružení sestavy 3:1 [P13]

Z porovnání výsledků ze simulací lemování dílu (Obr. 8.75), kde byly využity originální rozměry dílů a dílu, kde byl aplikován zákon podobnosti, je jasné, že trend odpružení dílů podle barevné mapy je stejný a opět je zde potvrzení hypotézy využití zákona podobnosti. Nicméně hlavním závěrem těchto simulací je využitelnost softwaru AutoForm Assembly pro produkční inženýrskou praxi uživatelů za využití virtuálních dílů s originálními rozměry (v měřítku 1:1) pro aplikaci metody drážkové fixace lemového spoje. [P13]

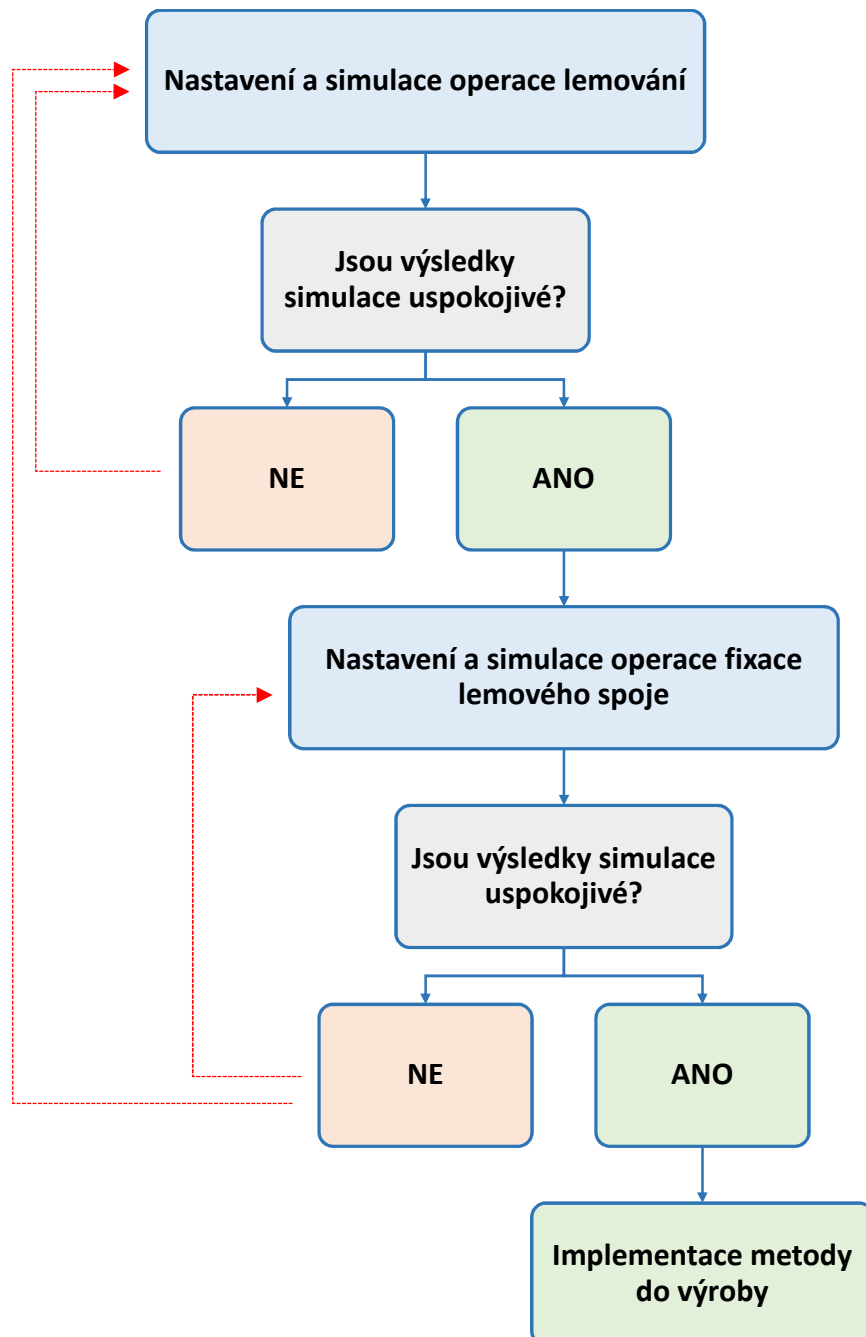


Obr. 8.75 - Porovnání výsledků odpružení 3:1 vlevo a 1:1 vpravo [P13]

I v tomto případě lze pro celkové zjednodušení a zlepšení orientace celou metodiku drážkové fixace lemového spoje shrnout do organizačního diagramu práce. Z důvodu, že se jedná o simulaci sestavy panelového dílu karoserie, bez virtuálního fyzického vytvoření

mechanického zámku, není nutné se zabývat v simulaci ražením fixačních elementů na vnější a vnitřní díl. V tomto případě postačí pouze pozice fixačních elementů ve formě bodů importovaných do softwaru.

8.7.1 Návrh organizačního diagramu práce pro software AutoForm Assembly [P13]



9 OVĚŘENÍ NAVRŽENÉ METODIKY DRÁŽKOVÉ FIXACE LEMOVÉHO SPOJE V PRAXI

Na základě navržené metodiky drážkové fixace lemového spoje proběhla i výroba několika kusů zkušebních kapot, kde byly aplikovány poznatky z průběhu zpracovávání disertační práce. Pro správnou funkčnost navrženého řešení je nutné sledovat dodržení několika důležitých kritérií (jsou vyjmenovány níže), dále bylo nutné provést kontrolu z hlediska auditové nezávadnosti kompletního dílu.

V rámci výroby motorových kapot vozidla, bylo prvním důležitým sledovaným kritériem, zda dochází ke správnému sestavení dílů k sobě. U první navržené varianty to znamená, jestli všechny háčky na stojině plechu správně zapadají po lemování do některé z drážek na vnitřním plechovém protikusku. Po první vyrobené přední kapotě, bylo díky vizuální kontrole určeno, že správné polohy má přibližně $\frac{3}{4}$ fixačních bodů. Z tohoto důvodu bylo potřeba provést korekce drah najíždění robota s přípravkem do pneumatických kleští u těch bodů, které byly vyhodnoceny jako chybné fixační body. Po provedení korekcí u dalších vyrobených zkušebních kapot byly již všechny fixační body vyhodnoceny jako správné.

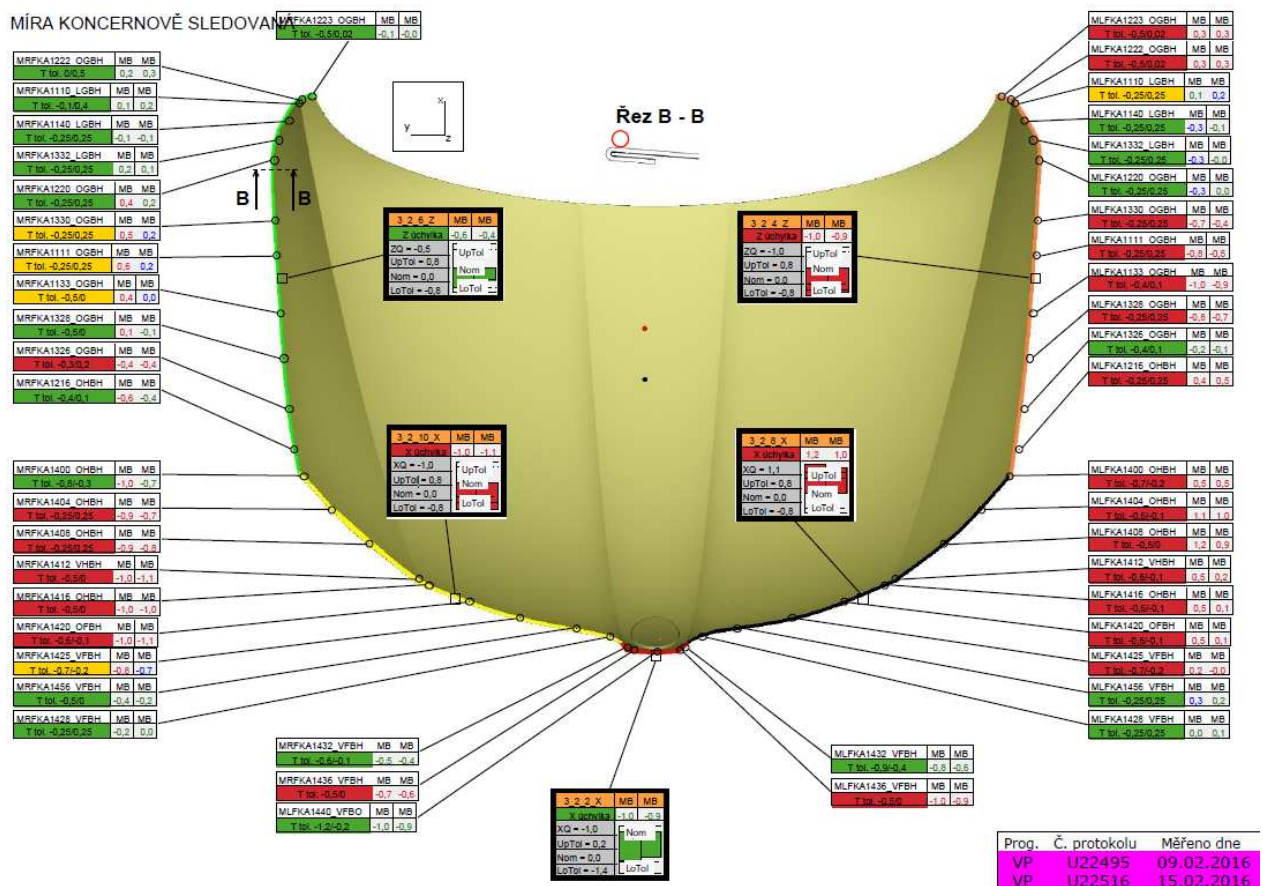
Dalším kritériem je sledování auditové nezávadnosti povrchového dílu. Povrchový pohledový díl musí být v perfektní kondici bez sebemenších náznaků geometrických změn dílu, které by nepříznivě ovlivnily výsledný vzhled dílu po lakování.

V našem případě lze uvažovat vnější pohledový díl z hlediska povrchu po lisování za bezproblémový, neboť kontrola povrchu z hlediska nezávadnosti po lisování probíhá v lisovně. U vzorkových kapot je ovšem nutné se zaměřit na polohy jednotlivých fixačních bodů, resp. na kontrolu povrchu v jednotlivých pozicích.

Dále je nutné se zaměřit, jestli se drážky na vnitřním dílu nepropisují a neznehodnocují povrchový díl v průběhu lemování, kdy na samotný lem působí velký tlak. I sebemenší propasání drážek do povrchu může znehodnotit celý díl. Pro vyhodnocení auditové nezávadnosti povrchu lemu se používá tzv. brousková metoda (blíže popsáno v kapitole „3.3 Příklad auditové kontroly po lemování v reálném provozu“). Při této kontrole se na povrchu projeví veškeré povrchové nerovnosti, které byly před brouskováním okem neviditelné. U všech zkušebních předních kapot, které dosud byly vyrobeny byla provedena tato kontrola a díky optimálnímu tvaru profilu drážek, nedochází k ovlivnění sledovaného povrchu na žádném z testovacích dílů. Na základě opakovaného vyhodnocení je možné říci, že z hlediska auditové nezávadnosti drážková metoda

fixace lemového spoje neovlivňuje povrchový díl přední kapoty a proto je možné takto navržené řešení považovat za optimální.

Posledním a zároveň nejdůležitějším sledovaným kritériem je celková rozměrová stabilita spojovaných dílů. Po výše zmíněných kontrolních operacích, je nutné provést rozměrovou kontrolu dílu po samotném zalemování a následně po vypálení laku. Kontrola probíhá pomocí mostového souřadnicového měřicího stroje, který díky vynikající mechanické konstrukci exceluje při vysoce přesné kontrole velkých dílů. Během kontroly jsou snímány jednotlivé referenční body po obvodu kapoty a na základě porovnání jednotlivých měření daného dílu před a po KTL procesu je vyhodnocena stabilita dílu. Na přiloženém obrázku níže je zobrazen výstup z měření přední kapoty, kde pro každý bod je uvedena naměřená odchylka referenčního bodu před KTL procesem a stejného bodu, stejného dílu po KTL procesu.



Obr. 9.1 - Výstup z měření přední kapoty před KTL a po KTL procesu

Z naměřených hodnot vyplývá, že maximální rozdíl mezi referenčními body při měření před KTL procesem a po KTL procesu se pohybuje do 0,4 mm. Tento výsledek je velice

příznivý neboť se dosahuje vyšší přesnosti než u současného sériového stavu ve výrobě Škoda Auto za využití konvenčních metod fixace – konkrétně metody VarioPicker.

Na základě analýzy výsledků všech experimentů je možné říci, že se potvrzuje hypotéza nového řešení fixace lemu drážkovým způsobem pro automobilovou praxi. Navržená varianta fixace lemového spoje vykazuje dostatečnou rozměrovou stabilitu spoje a splňuje veškeré požadavky, které jsou kladeny v rámci této problematiky.

Navržené řešení ovšem přináší i jednu nevýhodu a to během nanášení jemného utěsnění lemového spoje po KTL v oddělení lakovny Škoda Auto, kdy pracovník nanáší těsnící hmotu ručně pomocí speciální „pistole“. Pro zajištění správné polohy jemného utěsnění lemu, pracovník při ručním nanášení používá hranu stojiny vnějšího dílu, jako vedení. Z důvodu umístění fixačních háčků na této hraně po té může docházet k mírným odskokům nanášecí pistole v místech fixace a tím může dojít k vytvoření bublin v jemném utěsnění (Obr. 9.2). Jako řešení pro tento negativní jev se jeví využití robotického ramene pro upevnění nanášecí pistole a tedy proces nanášení jemného utěsnění lemu automatizovat a tím by se mělo zamezit odskokům během nanášení těsnění.



Obr. 9.2 – Bubliny na jemném těsnění lemového spoje

10 DISKUZE VÝSLEDKŮ A ZÁVĚR

V rámci disertační práce bylo potvrzeno, že hypotéza funkčnosti navrženého řešení, tedy mechanické drážkové fixace lemového spoje je ověřena a to jak ve virtuálním prostředí, tak i v reálné praxi.

Nově navržená mechanická metoda v porovnání s ostatními metodami, které jsou uvedeny v řešeršní části disertační práce (kap. 5 Současný stav fixace lemových spojů panelových dílů karoserie automobilu) nevyžaduje složité a energeticky náročné technologické zařízení pro realizaci. Metoda je navržena tak, aby se umožnilo v co největší míře využít tech. zařízení a příslušenství, které se standardně využívá v automobilové praxi. V rámci tohoto řešení je tedy nutné využití robotických ramen, přípravků pro upnutí dílů a pneumatických kleští se speciálními nástroji. Z důvodu, že pro samotnou realizaci fixačních prvků na jednotlivých dílech, tedy ražení drážek a háčků, se využívají pneumatické kleště, je tento provoz energeticky nenáročný a efektivní. Mechanická drážková fixace lemového spoje poskytuje dobrou stabilitu spojovaných dílů, která je sledována především v rámci výrobního procesu v oddělení svařovny a během manipulace až do té doby, kdy hlavní pevnostní funkci a rozměrovou stabilitu převezme vytvrzené lemové lepidlo – tedy zpravidla po KTL procesu.

Jak je známo, numerické simulace jsou hojně využívány v procesu návrhu výroby dílů karoserie a konstrukce samotných lisovacích nástrojů, ovšem využití simulací pro lemování je doposud prozkoumáno pouze do určité úrovně. Na základě zveřejněných článků [1, 29-36, 39], které se týkají numerických simulací lemování, je možné nalézt mnoho studií a experimentů, které se zabývají pouze simulacemi konvenčního a rolnového lemování, které bezpochyby přinášejí cenné informace. Tyto studie ovšem zpracovávají pouze základní problematiku lemování se základními okrajovými podmínkami. V tomto ohledu jsou navrženy i simulační softwary, které příliš neuvažují komplexnější řešení úloh pro lemování. Proto v rámci práce byl jedním z dílčích cílů prozkoumat možnosti numerických simulací právě v problematice mechanické fixace lemových spojů a určení metodiky, jak daný software správně používat pro dosažení vypovídajících výsledků, které je možné využívat v praxi.

Celkem byly využity 4 různé simulační softwary. Tyto softwary je hypoteticky možné rozdělit do 2 skupin. První skupinu můžeme volně nazvat jako softwary pro výzkumné účely a druhou skupinu jako softwary pro produkční praxi. Do první skupiny je možné zařadit softwary Simufact a Deform, které využívají objemové elementy pro výpočet. V obou

softwarech byla simulována základní operace lemování, které předcházelo ražení funkčních prvků fixace na jednoduché virtuální vzorky s jednou pozicí mechanické fixace. Po srovnání základních výsledků z obou softwarů a analýze chování spojovaných dílů během lemování bylo dospěno k závěru, že oba softwary jsou schopny tuto problematiku řešit. Pro určení optimálních parametrů drážkové fixace a dále i určení pevnosti jedné fixační pozice byl využit již pouze software Deform. Na základě výsledků simulací byly provedeny i reálné experimenty, kde byly simulační výsledky potvrzeny, a bylo zjištěno, že pokud jsou dodrženy všechny hodnoty parametrů, které byly určeny jako optimální pro správnou funkci drážkové fixace lemového spoje, dojde ke vzniku mechanického uzamčení lemového spoje.

S ohledem na využitelnost numerických simulací i v automobilové praxi, kde je nutné pracovat rychle a efektivně bylo nutné ověřit i možnosti využití softwarů AutoForm Forming a AutoForm Assembly, které je možné zařadit právě do druhé skupiny simulačních softwarů – tedy softwary pro produkční praxi, kde je potřeba dosažení rychlých výsledků. Na základě provedeného experimentu numerických simulací, bylo zjištěno, že využití produkčního softwaru, konkrétně AutoForm Forming je značně limitující. Pro navržené řešení drážkové fixace lemového spoje v originální podobě není software příliš využitelný, jelikož jednotlivé prvky fixace jsou příliš „malé“ na to, aby simulační software dokázal provést kvalifikovaný výpočet s přesnými výsledky. Na základě tohoto zjištění je nutné provést optimalizaci řešení úlohy. Optimalizace samotného návrhu, resp. designu spoje nebyla možná, především z důvodu limitujících kritérií lemového spoje a nutnosti dodržení malých rozměrů. Z toho důvodu bylo potřeba nalézt možnosti optimalizace řešení úlohy jinde. Jako finální řešení, na základě základních znalostí problematiky týkající se plastické deformace, bylo zvoleno experimentálně ověřit aplikační možnosti jednoho ze základních zákonů plastické deformace, konkrétně zákona podobnosti. Na základě a dodržení definice zákona podobnosti bylo možné upravit rozměry nástrojů a základního materiálu pro výpočet numerické simulace. Po úspěšné simulace tváření drážkového profilu a následném porovnání výstupů simulačního softwaru před optimalizací, po aplikaci zákona podobnosti a reálného experimentálního vzorku byla ověřena hypotéza možnosti aplikace zákona podobnosti pro navržení komplexní metodiky numerických simulací lemování s využitím mechanické fixace lemového spoje.

Po tomto ověření byla sestavena základní metodika komplexní simulace lemování na jednoduchém experimentálním dílu, který obsahuje 6 fixačních bodů podél svého obvodu. Jednotlivé výstupy úspěšně vypočítané simulace jednotlivých kroků procesu lemování a

základní metodiky je možné detailněji prostudovat v kapitole 8.6 Experiment simulace fixace s využitím SW AutoForm Forming.

Z výsledků komplexní simulace lemování je zjevné, že metodika se jeví jako správná a využitelná v reálné praxi, kdy využití simulačního softwaru opět může ulehčit práci a nadále zkrátit dobu nutnou pro návrh výroby.

Následně byla provedena ověřovací simulace už pro reálný díl kapoty automobilu, kde bylo 12 fixačních bodů, a byl aplikován zákon podobnosti. I v tomto případě simulace proběhla úspěšně a navržená metodika byla potvrzena.

Jako poslední simulační experiment byla provedena simulace v softwaru AutoForm Assembly. Díky zjednodušenému modelu výpočtu bodového spojení v softwaru AutoForm Assembly je tedy hypoteticky možné simulovat ve zjednodušené formě i mechanickou fixaci lemového spoje za předpokladu, že uživatel nemá požadavek sledovat průběh vytvoření mechanického zámku během lemování. Tento přístup je možné aplikovat za předpokladu, že uživatel již zná a má optimalizovanou celou metodu mechanické fixace, tzn. zná nastavení nástrojů a dalších parametrů pro vytvoření drážkové fixace lemového spoje. V případě disertační práce je tedy uvažováno, že proces mechanické drážkové fixace lemového spoje byl pro zvolené materiály a jejich tloušťky nalazen během prvních experimentů v softwarech Simufact a Deform a dále toto konkrétní nastavení bylo ověřeno pomocí reálného experimentu na malých zkušebních vzorcích. Za takového předpokladu byla tedy provedena úspěšná simulace fixace lemového spoje v softwaru AutoForm Assembly. Na základě porovnání výsledků varianty v měřítku 3:1 a 1:1, bylo potvrzeno, že tento přístup lze aplikovat pro díly s originálními rozměry a tím pádem odpadá příprava všech simulačních vstupů, která by musela proběhnout v případě aplikace zákona podobnosti.

Závěrem lze tedy shrnout, že v rámci této disertační práce byl proveden návrh a celkové ověření nové metodiky, jak docílit rozměrové stability panelových dílů karoserie automobilu, včetně ověření jednotlivých hypotéz pomocí mnoha experimentů ať už ve virtuálním prostředí, tak i v praxi.

Navržená metoda fixace lemových spojů je stabilní a efektivní způsob jak docílit rozměrové stálosti spojovaných dílů během výroby a vždy záleží na konkrétním uživateli, v jak detailní formě bude chtít implementovat tuto metodu v praxi. Tím se rozumí, že je možné využití numerických simulací pro tuto problematiku, nicméně využití simulací není nezbytně

nutné, pokud má uživatel možnost „naladit“ celý proces pro vlastní panelové díly přímo ve výrobě.

Tato metoda je primárně určena pro karosářské díly z hlubokotažné oceli, na které byla i ověřena. Konkrétně byly využity materiály DX54D a HX180BD, které se velice často využívají pro vnější a vnitřní díly v automobilové praxi po celém světě. Pro využití na další druhy materiálu je nutné celou metodu ověřit pomocí experimentů.

10.1 Splnění cílů disertační práce

V textu níže jsou uvedeny jednotlivé cíle disertační práce. U každého cíle práce je stručný komentář a vyjádření autora práce, jakým způsobem byl daný cíl v rámci disertační práce splněn.

- Návrh nového typu spoje, resp. nové metody fixace lemového spoje korespondující se všemi požadavky na spoj vyplývající z předchozích kapitol:

Návrh nového typu spoje je popsán v kapitolách „**7.2 Drážková fixace lemového spoje**“ a „**7.3 Návrh proveditelnosti**“, kde je popsána celá hypotéza nového typu mechanické drážkové fixace lemového spoje a návrh způsobu dosažení nového typu spoje společně s definicí materiálů, pro které je spoj navržen. Nový typ spoje koresponduje s požadavky vyplývajícími z rešerše a rozboru současného stavu problematiky. Cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn. [P1, P2, P3, P7, P8, P9, P10]

- Konstrukční řešení nového typu spoje:

Konstrukční řešení nového typu spoje je popsáno v kapitole „**7.3 Návrh proveditelnosti**“. Podrobnější popis nástrojů a pomůcek je dále popsán v podkapitolách „**7.3.2 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek do vnitřního plechu**“, „**7.3.3 Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků do stojiny na vnějším plechu**“ a „**7.3.4 Určení vhodného stroje pro zhotovení drážek a háčků**“. Rozměry nástrojů v měřítku 1:1 jsou v příloze disertační práce. Tento cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn. [P9, P10]

- Ověření navrženého konstrukčního řešení spoje:

Samotné ověření navrženého konstrukčního řešení spoje, které bylo vytipováno, jako optimální, je podrobněji popsáno v kapitole „**7.4 Ověření funkčnosti navržených nástrojů pro mechanickou fixaci lemových spojů**“, kde je ověřena funkčnost navržených nástrojů, a dále je ověření konstrukčního řešení popsáno v těch kapitolách, kde byly provedeny reálné experimenty na zkušebních vzorcích, např. i určení pevnosti spoje a analýza povrchových vad. Tento cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn. [P10]

- Návrh metodiky implementace numerických simulací pro nový typ spoje

Popis využití numerických simulací lze v disertační práci rozdělit do dvou kategorií. První kategorii lze nazvat ověření hypotézy nového typu spoje pomocí numerické simulace a pro tuto kategorii byly převážně využity simulace v softwarech Simufact a Deform, kde jsou využity solid elementy pro výpočet. Druhá hlavní kategorie je návrh metodiky a její ověření při využití softwarů od společnosti AutoForm, které se hojně využívají v automobilové praxi. To vše je uvedeno v kapitole „**8 Metodika numerických simulací drážkové fixace lemového spoje**“. Tento cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn. [P4, P5, P6, P11, P12, P13]

- Zhodnocení výsledků nového typu spoje

Jednotlivé výsledky návrhu metodiky nového typu spoje jsou vždy zhodnoceny v dílčích závěrech u jednotlivých bodů řešení v postupném vývoji řešení disertační práce. Samotné celkové zhodnocení nového typu spoje, rozbor aplikace nové metodiky a celkové zhodnocení jsou pak uvedeny v kapitole „**9 Ověření metodiky drážkové fixace lemového spoje v praxi**“ a kapitole „**10 Diskuze výsledků a závěr**“. Tento cíl byl v rámci řešení disertační práce splněn. [P13]

10.2 Přínos disertační práce

Hlavním přínosem práce je návrh nové metody fixace lemového spoje, která splňuje požadavky týkající se této problematiky, které jsou vyjmenovány v kapitole „**7.1 Požadavky na nový způsob fixace lemového spoje**“. Nová mechanická metoda fixace lemového spoje a návrh způsobu implementace této nové metody fixace lemového spoje splňuje tyto vyjmenované požadavky. Umožňuje nasazení do procesních úkonů návrhu výroby a následně i reálné nasazení do výroby právě na základě navržené metodiky. V rámci řešení disertační práce byla také potvrzena hypotéza aplikace zákona podobnosti pro tuto problematiku a je tedy umožněno využít i tento způsob řešení ve fázi návrhu výroby v rámci této problematiky. I přes to, že potvrzení navržené metodiky bylo provedeno na konkrétním díle (motorová kapota), celá metoda je univerzálně aplikovatelná i na další běžné panelové díly karoserie automobilu (boční dveře, víko kufru). Dalším přínosem je, že tuto metodu lze díky své univerzálnosti aplikovat i u dílů/celků z jiných odvětví (nejen automobilový průmysl), kde jednotlivé celky vznikají právě technologií lemování a je nutné dodržet kvalitativní požadavky nově vznikajících celků.

10.3 Návrh dalšího rozvoje metody

Do budoucna je vhodné se zabývat optimalizací metody pro určení minimálního potřebného množství fixačních bodů. Pokud bude stanoven minimální počet fixačních elementů a následně bude ověřeno, že kompletní díl se chová stabilně i se sníženým počtem fixačních bodů, bude možné dosahovat kratších výrobních časů a v té souvislosti i dojde i k úsporám celkových výrobních nákladů.

Dále je vhodné zabývat se i ověřením navržené metodiky pro rolnové lemování, případně pro kombinované lemování, které se skládá například z rolnového předlemování a konvenčního dolemování.

V rámci využití simulačního softwaru AutoForm Assembly by bylo vhodné, kdyby se developer softwaru zaměřil i na implementaci této metody do budoucí verze softwaru – tzn. možnost definice fixace lemového spoje v rámci jedné simulační operace lemování + fixace.

SEZNAM POUŽITÝCH LITERÁRNÍCH ZDROJŮ

- [1] JONKERS, B., *Simulation of the Robot Roller Hemming process*, Voestalpine Polynorm Automotive, Universiteit Twente, 2006 [cit. 2019-02-10]. s. 10-19. Dostupné z: <http://essay.utwente.nl/58315/>
- [2] *Technologie lepení v automobilovém průmyslu*, TUL, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie, 2008 [cit. 2018-07-10]
- [3] KOLNEROVÁ, M., *Metody tváření kovů a plastů: Pevnostní materiály v karoserii*. TUL, Fakulta strojní: Katedra strojírenské technologie – Oddělení tváření kovů a plastů. 2010 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/14385059-Pevnostni-materialy-v-karoserii.html>
- [4] ŠKODA AUTO A.S. Interní dokument, *Příručka lemování*, s. 1 - 23
- [5] ŠKODA AUTO A.S., *Folded seam connection*, CZ, Mladá Boleslav. EP2729265A1. Přihl.: 2011-06-30
- [6] ROUBÍČEK, M., *Problematika spojování pozinkovaných ocelí*, Seminár Nové Materiály, Technologie a zařízení pro svařování, Ostravice, 2003
- [7] MANLADAN, S., ABDULLAHI, I., HAMZA, M., A Review on The Application of Resistance Spot Welding of Automotive Sheets. *Journal of Engineering and Technology*. Vol. 10. 2015. s. 20-37 ISSN : 1597-5835.
- [8] MIKLÓS, B., WELTSCH, Z. Experimental Studies of Different Strength Steels MIG Brazed Joints. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, Vol. 47(1). 2018. s. 63-68. DOI: 10.3311/PPtr.12107
- [9] HONDA MOTOR CO., *Hemming working method and panel assembly manufacturing method*. Hasegawa, Takeishi, Nakamura. JP2008229697A. Přihl. 2007-03-23
- [10] SVENSSON, M., MARK, A., EDELVIK, F., KRESSIN, J., BOLIN, R., SEGERDAHL, D., CARLSON, J., WAHLBORG, P-J., SUNDBÄCK, M., *Process Simulation and Automatic Path Planning of Adhesive Joining*. Procedia CIRP 44. 6th CIRP Conference on Assembly Technologies and Systems (CATS), Sweden, 2016. s. 298-303
- [11] ASHIDA, T., KAJIHATA, K., OZEKI, M., Technical Note: Development of pseudo-curable adhesives for hem flange bonding. *Int. J. of Materials and Product Technology* Vol. 6. 1991 s. 87 – 92. DOI: 10.1504/IJMPT.1991.036669
- [12] FCA US LLC. *Electromagnetic hemming machine and method for joining sheet metal layers*. John McClure, Suresh Ramalingam, James Lezotte. US. US20050109769A1. Přihl. 2003-11-21
- [13] GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS LLC. *Roller hemming with in-situ adhesive curing*. Sampath K. Vanimisetti, Rajesh Raghavan, John E. Carsley. US. 341992. Přihl. 2010-05-05.

- [14] GM GLOBAL TECHNOLOGY OPERATIONS LLC. *Method of joining by roller hemming and solid state welding and system for same*. John E. Carsley, Blair E. Carlson, James G. Schroth, David R. Sigler. US. US20120204412A1. Příhl. 2011-02-10.
- [15] MOTORS LIQUIDATION CO. *Method of making hemmed joints utilizing laser welding*. Frederick D. Petrick. US. US4916284A. Příhl. 1989-05-08.
- [16] MUELLER, R., *Laser welding of hem flange joints*. International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics. F11-F20. 2000. DOI: 10.2351/1.5059541
- [17] FFT [online], s. 1 [cit. 2021-05-05] Dostupné z: <https://www.fft.de/en/products/produktfamilien/fuegen-falzen-und-trennen/schweisstechnik/variopicker/>
- [18] GENERAL MOTORS CORPORATION, *Method of interlocking hemmed together panels*. Polon, Shelby, Mich, Detroit, Mich. US. 5237734. Příhl. 1993-08-24
- [19] FORD GLOBAL TECHNOLOGIES LLC. *Hem construction for vehicular closure structure*. Brent R. Sovoda. US. US2005/0102817A1. Příhl. 2005-05-19.
- [20] WOJCIK, R., *Porovnání ocelí a technologií při výrobě automobilové karoserie*. Brno, 2011. Bakalářská práce VUT v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce: Ivo Dohnal.
- [21] HRDÝ, P., *Vliv bh efektu na změnu mechanických vlastností u ultra-pevnostních ocelových plechů*. Liberec, 2015. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci – Fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
- [22] MAZANCOVÁ, E., *Technické materiály I. - Kovové materiály*, Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2012, s. 41-51, ISBN 978-80-248-2577-9
- [23] PRŮCHA, V., *Vývoj mikrostruktury vícefázové oceli s TRIP efektem*, Plzeň, 2013, 79 s., Diplomová práce, ZČU, Vedoucí práce: doc. Ing. Ludmila Kučerová, Ph.D.
- [24] SIGVANT, M.; *The Hemming Process – A Numerical and Experimental Study*, Goteborg, Chalmers university of technology – Department of structural engine and mechanics computational mechanics, 2003, s. 2-28, ISBN 91-7291-384-3
- [25] PAČÁK, T., *Compensation of the springback behavior in large sheet metal stamping*, Praha, 2018, 164 s., Disertační práce. ČVUT v Praze, Fakulta strojní. Vedoucí práce: doc. Ing. Viktor Kreibich, CSc.
- [26] SOLFRONK, P., *Numerická podpora výroby výlisků z plechu*. Liberec, 2012. Habilitační práce. Technická univerzita v Liberci.
- [27] BOERAEVE, P. *Introduction To The Finite Element Method (FEM)*. Institut Gramme – LIEGE, 2010. s. 3-68. [cit. 2021-05-05] Dostupné z: <https://docplayer.net/21719649-Introduction-to-the-finite-element-method-fem.html>
- [28] BATHE, K. J.. *Finite Element Procedures: Second Edition*. Watertown, 2016. ISBN 978-0-9790049-5-7.

- [29] ČADA, R., *Technologie I: studijní opora*, VŠB – Technická univerzita Ostrava, 2007, s. 54.
- [30] GROCHE, P., WOHLLETZ, S., BRENNEIS, M., PABST, C., RESCH, F., Joining by forming—A review on joint mechanisms, applications and future trends, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 214, Issue 10, October 2014. s.1972-1994. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2013.12.022
- [31] HAMEDOM, Z., MORI, K., ABE, Y., *Hemming for Joining High Strength Steel Sheets*, 11th International Conference on Technology of Plasticity, 19-24 October 2014, Nagoya, Japan. s. 2074-2079. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.288
- [32] SVENSSON, M., MATTIASSON, K., Three-dimensional simulation of hemming with the explicit FE-method, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 128, Issues 1-3, 6 October 2002, s. 142-154. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00441-7
- [33] ZHANG, G., HAO, H., WU, X., HU, J., HARPER, K., FAITEL, W., An Experimental Investigation of Curved Surface-Straight Edge Hemming, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 2, Issue 4, 2000, s. 241-246. DOI: 10.1016/S1526-6125(00)70025-9
- [34] WANINTRADUL, C., GOLOVASHCHENKO, S., GILLARD, J., SMITH, L.M., Hemming process with counteraction force to prevent creepage, *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 16, Issue 3, August 2014, s. 379–390 DOI: 10.1016/j.jmapro.2014.04.003
- [35] THUILLIER, S., MAOUT, N., MANACH, P.Y., DEBOIS, D., Numerical simulation of the roll hemming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 198, Issues 1-3, 3 March 2008, s. 226-233 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.07.004
- [36] MAOUT, N., MANACH, P.Y., THUILLIER, S., Influence of prestrain on the numerical simulation of the roller hemming process, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.212, Issue 2, 2012, s.450-457 DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.10.008
- [37] WANG, E., et. Al., *Back to Elements - Tetrahedra vs. Hexahedra*. CAD-FEM GmbH. Munich, Germany. [cit. 2021-06-01] Dostupné z: <https://docplayer.net/21829223-Back-to-elements-tetrahedra-vs-hexahedra.html>
- [38] FUKSA, M. a R. HALAMA. *MKP a MHP - metoda konečných prvků a hraničních prvků*. Ostrava, 2011. [cit. 2016-05-02]. Dostupné z: http://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/metoda_konecnych_prvku_a_hranicnich_prvku.pdf
- [39] CHASTEL, Y., PASSEMARD, L., *Joining technologies for future automobile material modules*, 11th International Conference Technology of Plasticity, 19-24 October 2014, Nagoya, Japan DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.293
- [40] QUINTINO, L., PIMENTA, G., IORDACHESCU, D., MIRANDA, R.M., PÉPE, N. MIG Brazing of Galvanized Thin Sheet Joints for Automotive Industry. *Materials and*

Manufacturing Processes, Vol. 21 (1), 2006, s. 63-73. DOI: 10.1081/AMP-200060621

- [41] LIVATYALI, H., MUDERRISOGLU, A., AHMETOGLU, M.A., AKGERMAN, N., KINZEL, G.L., ALTAN, T., Improvement of hem quality by optimizing flanging and pre-hemming operations using computer aided die design, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 98, Issue 1, 15 January 2000, s. 41-42 DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00304-0

SEZNAM PUBLIKACÍ AUTORA DISERTAČNÍ PRÁCE

Publikace přímo související s tématem disertační práce

- [P1] CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Analýza vlastností mechanického spoje dílů karoserie automobilu*, Praha, 2012. 59 s., CD. Bakalářská práce. FS ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. František Tatíček
- [P2] CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Spojování dílů karoserie automobilu*, Praha, 2014. 83s., CD. Diplomová práce. FS ČVUT v Praze, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Ing. František Tatíček
- [P3] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; TATÍČEK, F.; KUBELKA, M.; PAČÁK, T.; HÁLEK, J.; VOJKOVSKÝ, K.; PEPELNJAK, T. *The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints*. In: Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2014. Rijeka: Faculty of Engineering University of Rijeka, 2014. pp. 373-376. ISSN 1849-0662.
- [P4] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; ŠANOVEC, J.; PAČÁK, T. *FEM Simulation of Mechanical Fixation of Hemmed Joints*. In: Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. p. 75-79. ISBN 978-80-87583-26-5.
- [P5] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; ŠANOVEC, J.; MARTAWIRYA, Y.Y.; VALEŠ, M. *The Law of Similarity and its Application for Numerical Simulation of Sharp Geometries in Stamping*. In: Metal 2018 Conference proceedings. Ostrava: TANGER, 2018. p. 378-383. 1st. ISBN 978-80-87294-84-0.
- [P6] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; ŠANOVEC, J.; MARTAWIRYA, Y.Y.; VALEŠ, M. *Applicability verification of autoform software for fem simulation of mechanical fixation of hemmed joints*. Acta Polytechnica. 2019, 59(6), 544-549. ISSN 1210-2709.
- [P7] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; KUBELKA, M.; PAČÁK, T.; CVEŠPER, D.; TATÍČEK, F. *The Issue of Ensuring the Dimensional Stability of Molded Car Body Joints*. In: Technological Forum 2014. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2014. pp. 60-65. ISBN 978-80-87583-10-4.
- [P8] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; HÁLEK, J.; TATÍČEK, F.; PAČÁK, T.; KUBELKA, M. *The Methods of Fixation and Stabilization of Hemmed Joints for Panel Parts of Car Body Parts*. In: Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015. pp. 57-60. ISBN 978-80-87583-13-5.
- [P9] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; HÁLEK, J.; PAČÁK, T.; TATÍČEK, F. *Methodology for mechanical joining of sheets for designing the hemmed joints*. In: Metal 2016: 25th International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: Tanger, 2016. pp. 345-349. ISBN 978-80-87294-67-3.
- [P10] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; HÁLEK, J. *Mechanical Joining of Sheet with Focusing on the Fixation of Hemmed Joints of the Steel Car Body Panel Parts*. In: Technological forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016. pp. 62-65. ISBN 978-80-87583-17-3.

- [P11] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; *Mechanická fixace lemových spojů* [přednáška]. Mladá Boleslav, Česká společnost pro výzkum zpracování plechu, Odborný seminář: Plošné tváření a spojování plechu v automobilovém průmyslu, 12.9.2018
- [P12] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; VALEŠ, M., HAVELKA, J. *Usability of AutoForm Forming Software for Grooved Fixation of the Hemmed Joints*. In: Technological Forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021
- [P13] CHRÁŠŤANSKÝ, L.; NOVÁK, V., HEJNIC, J. *Usability of AutoForm Assembly Software for Grooved Fixation of the Hemmed Joints*. In: Technological Forum 2021. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2021

Ostatní publikace autora disertační práce

CHRÁŠŤANSKÝ, L.; VALEŠ, M. *Metody spojování využívající principy plastické deformace*. MM Průmyslové spektrum. 2018,(1,2), 46-47. ISSN 1212-2572.

CHRÁŠŤANSKÝ, L.; VALEŠ, M.; TATÍČEK, F.; ŠATNÁ, K. *Properties of 3D Printed Samples*. In: Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. p. 80-85. ISBN 978-80-87583-26-5.

HEJNIC, J.; TATÍČEK, F.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.; NOVÁK, V. *Modern process of roll forming design*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 69-74. ISBN 978-80-87583-32-6.

KREJSA, P.; NOVÁK, V.; TATÍČEK, F.; VALEŠ, M.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Determination of forming limit curves according to tensile test and aramis system*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 82-89. ISBN 978-80-87583-32-6.

NOVÁK, V.; VALEŠ, M.; TATÍČEK, F.; ŠANOVEC, J.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *The Effect of Punch Speed on Position of Forming Limit Curve*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 105-108. ISBN 978-80-87583-30-2.

NOVÁK, V.; VALEŠ, M.; TATÍČEK, F.; ŠANOVEC, J.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *The Effect of Strain Rate on Position of Forming Limit Curve*. In: METAL - CONFERENCE PROCEEDINGS. Ostrava: Tanger Ltd., 2019. p. 450-454. 1. ISBN 978-80-87294-92-5.

PAČÁK, T.; KUBELKA, M.; TATÍČEK, F.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *The Methodology and Determination of the Springback in Large Metal Stamping*. In: Technological forum 2015, 6th International Technical Conference, Book of Proceedings. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2015. pp. 97-101. ISBN 978-80-87583-13-5.

PAČÁK, T.; TATÍČEK, F.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Analysis of the Springback Behavior under Various conditions with use of AutoForm SIGMA*. In: Technological forum 2016. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2016. ISBN 978-80-87583-17-3.

PAČÁK, T.; TATÍČEK, F.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Verification of Springback Analysis Accuracy in Deep Drawing Process with Focus on Initial Setting of Numerical Simulation*. In: Metal 2016: 25th International Conference on Metallurgy and Materials. Ostrava: Tanger, 2016. pp. 464-469. ISBN 978-80-87294-67-3.

- TATÍČEK, F.; NOVÁK, V.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.; VALEŠ, M.; ČERMÁK, J.; ŠANOVEC, J.; MACHKA, B.. *Analysis of Trimming Tool*. In: Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. p. 202-205. ISBN 978-80-87583-26-5.
- TATÍČEK, F.; NOVÁK, V.; VALEŠ, M.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.; MACHKA, B.; MATYÁŠ, M.. *Research and development in the steel door frames*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2020. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2020. p. 137-141. ISBN 978-80-87583-32-6.
- TATÍČEK, F.; VALEŠ, M.; MACHKA, B.; CHRÁŠŤANSKÝ, L. *Analýza současného stavu – dělení a spojování materiálu*. [Research Report] Praha: ČVUT FS, Ústav strojírenské technologie, 2018. Report no. U12133/2018/042.
- VALEŠ, M.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.; TATÍČEK, F.; PAČÁK, T.. *Comparison of Numerical Simulation and Deep Drawing Test of DP500 Steel*. In: Metal 2018 Conference proceedings. Ostrava: TANGER, 2018. p. 501-506. 1st. ISBN 978-80-87294-84-0.
- VALEŠ, M.; NOVÁK, V.; TATÍČEK, F.; ŠANOVEC, J.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.. *Feasibility of DP500 Steel Outer Car Body Parts*. In: TECHNOLOGICAL FORUM 2019. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2019. p. 170-176. ISBN 978-80-87583-30-2.
- VALEŠ, M.; NOVÁK, V.; TATÍČEK, F.; ŠANOVEC, J.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.. *Outer Car Body Panels Made of Dual-Phase Steel*. In: METAL - CONFERENCE PROCEEDINGS. Ostrava: Tanger Ltd., 2019. p. 507-512. 1. ISBN 978-80-87294-92-5.
- VALEŠ, M.; VLK, V.; TATÍČEK, F.; CHRÁŠŤANSKÝ, L.. *Properties of Steel Hybrid Sandwich Materials*. In: Technological forum 2018 Book of Proceeding. Jaroměř: Ing. Jan Kudláček, 2018. p. 217-220. ISBN 978-80-87583-26-5.

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 2.1 – Schéma lemování.....	13
Obr. 2.2 – Řez lemovým spojem	13
Obr. 2.3 – Konvenční lemovací zařízení [2].....	15
Obr. 2.4 – Vertikální lemovací systém [1].....	15
Obr. 2.5 - Horizontální lemovací systém [1]	15
Obr. 2.6 – Rolnové lemování.....	16
Obr. 2.7 – Schéma rolnového lemování [1].....	17
Obr. 3.1 – Oblasti lemového spoje (vnější oblast lemu, vnější radius, vnitřní oblast lemu) [1]	18
Obr. 3.2 - Řez lemovým spojem [3]	20
Obr. 3.3 – Znázornění parametru Roll-in [1].....	21
Obr. 3.4 - Mezera mezi panelovým dílem a karoserií [1].....	21
Obr. 3.5 - Zarovnání – “Flush” [1]	22
Obr. 4.1 - Lemové lepidlo mezi vnitřním a vnějším plechem	25
Obr. 4.2 Možnost posunu vnitřního plechu vůči vnějšímu v lemovém spoji.....	25
Obr. 5.1 - Zajištění plechů proti pohybu bodovým svařováním.....	28
Obr. 5.2 - Fixace lemu průvarem pomocí technologie MIG pájení.....	29
Obr. 5.3 - Lemovací rolna [9]	29
Obr. 5.4 - Robotické nanášení lepidla na vnější plechový díl dveří automobilu.....	31
Obr. 5.5 - Přípravek želatiny motorové kapoty modelu SK251	32
Obr. 5.6 - Schématický pohled na elektromagnetickou fixaci lemového spoje [12].....	33
Obr. 5.7 - Proces dolemování rolnou a vytvrzení lepidla [13]	34
Obr. 5.8 – Princip fixace lemového spoje s využitím ultrazvukového svařování [14].....	35
Obr. 5.9 – Pohled v řezu na ultrazvukovou metodu fixace lemového spoje [14].....	35
Obr. 5.10 – Fixace lemového spoje laserem [15, 17]	36
Obr. 5.11 – Zařízení pro metodu VarioPicker [17].....	37
Obr. 5.12 – Detail na proces fixace lemového spoje metodou VarioPicker [17]	37
Obr. 5.13 - Orientace výstupků [18].....	38
Obr. 5.14 - Příčný a podélný řez výstupkem [18].....	38
Obr. 5.15 - Způsob lemování ve tvarovém nástroji [18]	39
Obr. 5.16 - Fixace dutinovou lemovací vložkou [19].....	39
Obr. 5.17 - Vytvoření zámkového výstupku [5].....	41
Obr. 5.18 - Umístění zámkových výstupků na bočních dveřích automobilu	41
Obr. 5.19 - Zalemované zámkové výstupky	42
Obr. 5.20 - Řez fixačním bodem lemového spoje	42
Obr. 7.1 - Princip mechanického zámku [P9].....	47
Obr. 7.2 - Ovlivnění stability lemového spoje vlastní tíhou bez použití fixace (nahore) a s fixací (dole)	48
Obr. 7.3 - Příklad pozic fixačních bodů [P10].....	49
Obr. 7.4 - Princip BH efektu [18]	52
Obr. 7.5 - Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření drážek [P9, P10]	53
Obr. 7.6 - Návrh konstrukce nástroje pro vytvoření háčků [P9, P10]	54
Obr. 7.7 - Pneumatické kleště Eckold pro nástroje [P9].....	54

Obr. 7.8 - Drážky na vnitřním plechu (vlevo), změna profilu drážek nastavením dosedacích ploch razníku (vpravo) [P9].....	55
Obr. 7.9 - Háček na stojině vnějšího plechu připraveného pro lemování [P9].....	56
Obr. 7.10 - Přípravky pro upnutí a manipulaci s plechy: pro vnitřní díl kapoty (vlevo) a pro vnější díl kapoty (vpravo) [P10]	56
Obr. 7.11 - Simulace drah robota s upínacími přípravkem a vnějším dílem kapoty na pozice fixačních bodů [P9].....	57
Obr. 8.1 – Příklad dílů z numerické simulace lisovacího procesu vnitřní kapoty automobilu [25].....	59
Obr. 8.2 – Souvislosti fyzikálního a matematického modelování s fyzikálním experimentem [26].....	60
Obr. 8.3 – Příklady nejčastěji používanějších typů elementů pro řešení různých problémů.[27]	61
Obr. 8.4 – Přehled metod, využívaných pro modifikaci výpočetní sítě. [27].....	62
Obr. 8.5 – Rozdělení H-metody [27]	62
Obr. 8.6 – Grafické vysvětlení posunu v závislosti na napětí v membránovém elementu [34]	63
Obr. 8.7 – 3-uzlový trojúhelníkový membránový element [28].....	64
Obr. 8.8 – Shell element – zakřivený [28].....	64
Obr. 8.9 - 3D elementy konečnoprvkové sítě – rozdíl mezi tetrahedra a hexahedra elementem, jednotlivé výstupy a až f reprezentují různou výšku úvratě kovadel [28]	65
Obr. 8.10 – Příklad simulace postranice karoserie	67
Obr. 8.11 – Příklad sestavy karoserie vozu	68
Obr. 8.12 – Možnosti simulací v softwaru Simufact Forming	69
Obr. 8.13 – Simulace drážkového profilu [P4].....	71
Obr. 8.14 – Simulace výstupků na stojině plechu [P4].....	72
Obr. 8.15 - Sestava vnějšího a vnitřního dílu před lemováním	72
Obr. 8.16 – Simulace lemování v SW Simufact [P4]	73
Obr. 8.17 – 3D pohled v řezu [P4].....	73
Obr. 8.18 – Simulační úloha ražení drážek před výpočtem a po výpočtu [P4, P11].....	74
Obr. 8.19 – Simulační úloha ražení výstupků před výpočtem a po výpočtu [P11]	75
Obr. 8.20 – Simulace lemování v softwaru Deform-3D [P4].....	75
Obr. 8.21 – Zobrazení parametrů A a B na drážkovém nástroji [P11]	76
Obr. 8.22 - Drážkový nástroj upnutý v pneumatických kleštích	77
Obr. 8.23 - Řezy zkušebními vzorky pro nastavení drážkového nástroje [P11]	78
Obr. 8.24 - Vliv tlaku na hloubku drážek [P11]	78
Obr. 8.25 - Nastavení pozice drážkového profilu vůči hraně dílu [P11].....	79
Obr. 8.26 – Parametr zanoření plechu do nástroje - C [P11].....	80
Obr. 8.27 - Různá výška výstupků a její vliv na vytvoření spoje [P11]	81
Obr. 8.28 – Srovnání jednotlivých vzorků pro různý parametr C [P11]	81
Obr. 8.29 - Porovnání výsledku simulace a reálného lemového spoje s drážkovou fixací [P11]	82
Obr. 8.30 - Detailní pohled shora na lem s drážkovou fixací. [P11]	82
Obr. 8.31 - Sestava zkušební vzorky připravená pro lemování [P11]	83
Obr. 8.32 - Zalemovaný zkušební vzorek s více pozicemi drážkové fixace [P11].....	83
Obr. 8.33 - Tvar zkušební vzorku pro určení pevnosti lemového spoje s fixací [P11]	84
Obr. 8.34 - 3D model upínacího přípravku pro test pevnosti	85

Obr. 8.35 - Princip zkoušky pevnosti a upínací přípravek v univerzálním zkušebním stroji [P11].....	85
Obr. 8.36 - Pevnost spoje – realita vs. simulace [P11]	86
Obr. 8.37 - Zkušební vzorek po vytržení	86
Obr. 8.38 - Zkušební vzorek pro hodnocení povrchu s vyznačenými pozicemi fixace.....	87
Obr. 8.39 - Analýza kvality povrchu v softwaru GOM [P11]	88
Obr. 8.40 - Pohled v řezu výstupem simulace strategie CE společně s nástrojem (funkční části nástroje jsou barevně odlišeny) [P6].....	90
Obr. 8.41 – Nejlepší výsledek simulace -strategie UD ₂ (a – šířka profile v mm; b – isometrický pohled na výsledek; c – FLD diagram) [P5].....	91
Obr. 8.42 – Výsledek simulace po aplikaci zákona podobnosti a při využití strategie FV (a – šířka profile v mm; b – isometrický pohled na výsledek; c – FLD diagram) [P5].....	94
Obr. 8.43 - Experimentální vzorek drážkování [P5].....	95
Obr.8.44 - Zjednodušená metoda simulace [P6].....	95
Obr. 8.45 – Sesazení vnitřního plechu a vnějšího plechu pro lemování [P6].....	96
Obr. 8.46 – Pohled v řezu simulačním výsledkem po aplikaci zákona podobnosti [P6].....	96
Obr. 8.47 – Pohled v řezu reálným vzorkem (tl. plechů 0,65mm) [P6]	96
Obr. 8.48 - Vycentrování dílů [P12]	97
Obr. 8.49 - Sestavení dílů [P12]	98
Obr. 8.50 – Předlemování [P12]	98
Obr. 8.51 – Dolemování [P12].....	99
Obr. 8.52 - Detaily fixačního bodu v průběhu numerické simulace [P12].....	99
Obr. 8.53 – Simulace po aplikaci zákona podobnosti, měřítko 3:1 [P12]	100
Obr. 8.54 – FLD diagram.....	101
Obr. 8.55 - CAD model vnitřního dílu kapoty v měřítku 3:1	101
Obr. 8.56 - Pozice drážek na vnitřním díle kapoty [P12]	102
Obr. 8.57 – Drážkový profil na vnitřním díle kapoty	103
Obr. 8.58 - Drážkový profil na vnitřním díle kapoty [P12].....	103
Obr. 8.59 - Detail drážkového profilu v řezu [P12].....	104
Obr. 8.60 - FLD diagram ražení drážek na vnitřní díl kapoty [P12]	104
Obr. 8.61 - CAD model vnějšího dílu kapoty v měřítku 3:1 [P12]	104
Obr. 8.62 - Pozice fixačních výstupků [P12].....	105
Obr. 8.63 - Detail na háčky na stojině vnějšího dílu kapoty [P12].....	105
Obr. 8.64 - Detail řezem háčku na stojině vnějšího dílu kapoty [P12].....	106
Obr. 8.65 - Sesazení vnějšího a vnitřního dílu pro lemování [P12].....	106
Obr. 8.66 - Detailní pohled na pozici drážkové fixace sesazených dílů před lemováním [P12]	107
Obr. 8.67 – Rozměry lemového spoje pro určení pozice drážek.....	107
Obr. 8.68 - Špatně vytvořený mechanický spoj [P12].....	108
Obr. 8.69 – Spoj po virtuální korekci pozice drážek [P12]	109
Obr. 8.70 – Výsledek simulace lemování [P12]	109
Obr. 8.71 - Výsledek analýzy odpružení [P12]	110
Obr. 8.72 – Pozice fixačních bodů v softwaru AutoForm Assembly.....	113
Obr. 8.73 – Výsledek odpružení sestavy 1:1 [P13]	113
Obr. 8.74 – Výsledek odpružení sestavy 3:1 [P13]	114
Obr. 8.75 - Porovnání výsledků odpružení 3:1 vlevo a 1:1 vpravo [P13]	114
Obr. 9.1 - Výstup z měření přední kapoty před KTL a po KTL procesu	117

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Postup výrobního procesu při lemování s výstupkovým odporovým svařováním [9]	30
Tab. 2 Výhody a nevýhody konvenčních metod fixace lemových spojů	44
Tab. 3 Vnitřní plech kapoty	50
Tab. 4 Vnější plech kapoty	50
Tab. 5 Specifikace pneumatických kleští Eckold	55
Tab. 6 Strategie nastavení parametrů simulačního výpočtu [P6]	89