



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY VODÍČÍHO TÁHLA

PROPOSAL OF PRODUCTION TECHNOLOGY OF UNI-AXIAL ROD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Václav Zejda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Řiháček, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Václav Zejda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Jan Řiháček, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh technologie výroby vodícího táhla

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Vodící táhla se nyní vyrábí z trubek a kovaných nebo odlévaných hlav. Z důvodu požadavků na snížení hmotnosti a ceny byl formou THK navržen nový design produktu, k jehož výrobě se uvažuje využití technologie plošného tváření. Na tuto oblast bude rovněž vypracována literární rešerše. Dále bude práce obsahovat návrh technologického postupu výroby součásti a závěry se zhodnocením navrhované technologie. V tomto směru se rovněž počítá s ověřením návrhu užitím numerické simulace.

Cíle diplomové práce:

- zhodnocení možností výroby,
- vypracování aktuální literární rešerše se zaměřením na plošné tváření,
- návrh tvářecích nástrojů a postupu výroby,
- užití numerické simulace pro ověření výrobitelnosti a příp. optimalizaci.

Seznam doporučené literatury:

ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. Sheet metal forming: processes and applications. Materials Park, Oh: ASM International, 2012. ISBN 1615038442.

ASM INTERNATIONAL. Metal Handbook Volume 22B: Metals process simulation. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 2010. ISBN 978-161-5030-057.

FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.

LOGAN, Daryl L. A first course in the finite element method. United States: Cengage Learning, 2007, 808 s. ISBN 978-0-534-55298-6.

TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. Hluboké tažení plechu na lisech. Praha: Nakladatelství technické literatury. 1990. 198 s. ISBN 80-03-00221-4

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

ZEJDA Václav: Návrh technologie výroby vodícího táhla.

Práce je zaměřena na návrh výroby lisované součásti vodícího táhla umístěného v nápravě nákladního automobilu. Výrobek je z materiálu S420MC o tloušťce 4 mm a plánovaná výrobní série je 84 000 kusů ročně po dobu 7 let. Kritickým místem pro výrobu je válcový lem tvořící budoucí oporu pouzdra silentbloku. Požadovanou výšku lemu není možné vyrobit klasickým jednooperačním postupem, což bylo experimentálně ověřeno. S využitím numerické simulace v programu PAM-STAMP byl navržen víceoperační postup výroby. Pro tento postup výroby byl zkonstruován postupový sdružený nástroj. Maximální zatížení lisu je 5 057 kN. Výroba bude probíhat na lise Kaiser 8000–50–F5–RKM od ANDRITZ Metals. Jmenovitá síla lisu je 8 000 kN.

Klíčová slova: ocel S420MC, střihání, dvoukrokové střihání, lemování, poměr rozšíření otvoru, postupový nástroj

ABSTRACT

ZEJDA Václav: Proposal of production technology of uni-axial rod.

The thesis is focused on the proposal of production of a stamped part of the uni-axial rod located in the axle of the truck. The uni-axial rod is made of material S420MC with thickness of 4 mm and the planned series production is 84 000 pieces per year for 7 years. The most difficult point for production is a collar, which create support of the bushing. It is not possible to produce a required height with conventional one-stage process, which was experimentally verified. In the program PAM-STAMP there was designed multiple-stage process of the production with the use of numerical simulation. The progressive die was designed for this process of the production. Maximal load of a forming press is 5 057 kN. Production will be located on the forming press Kaiser 8000-50-F5-RKM by ANDRITZ Metals. Maximum force of the forming press is 8 000 kN.

Keywords: steel S420MC, shear cutting, two-stage shear cutting, flanging, hole expansion ratio, progressive die

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZEJDA, Václav. *Návrh technologie výroby vodícího táhla* [online]. Brno, 2020. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124170>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jan Řiháček.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 26.6.2020

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji především vedoucímu práce, panu Ing. Janu Řiháčkovi, Ph. D. za poskytnutí cenných rad a podnětných připomínek týkajících se zpracování diplomové práce. Poděkování patří i mojí rodině a mým blízkým za neustálou podporu a pomoc během studia. V neposlední řadě děkuji firmě THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH a.s. za poskytnutí potřebných informací, materiálů a spolupráci.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Úvod	9
1 Rozbor zadání	10
1.1 Varianty řešení	12
1.1.1 Příprava polotovaru	12
1.1.2 Tvarování dílce	13
2 Stříhání	14
2.1 Stav napjatosti při stříhání	16
2.2 Střížná síla a práce	17
3 Lemování	18
3.1 Lemování otvorů	19
3.1.1 Napěťový stav	19
3.1.2 Deformační stav a vliv kvality plochy otvoru a přidržovač na jeho parametry ..	21
3.1.3 Stanovení síly	22
3.1.4 Přípravky, nástroje a rozměry polotovaru	23
3.1.5 Lemování se ztenčením stěny	24
3.1.6 Jednobodové přírůstkové lemování	25
3.1.7 Další způsoby výroby válcových lemů	27
3.2 Ostatní lemy	29
3.3 Defekty lemů	30
4 tvářitelnost v technologii plošného tváření	31
4.1 Mezní tvářitelnost	32
4.2 Experimentální stanovení FLC	33
4.3 Limity použití limitní křivky K-G diagramu	36
4.3.1 Ohýbání a tvorba přímých lemů	36
4.3.2 Rozšiřování otvoru	37
4.3.3 Blízkost hrany	39
4.3.4 Nelineární deformační dráhy a více operační výrobní postupy	41
4.4 Možnosti zvýšení HER	42
5 Návrh výroby	44
5.1 Materiálový model pro numerickou simulaci	45

5.2 Experimentální zjišťování HER	48
5.2.1 Vzorky s otvory zhotovenými laserem	50
5.2.2 Vzorky s otvory zhotovenými prostřihem	51
5.3 Experimentální ověření materiálového modelu	53
5.4 Výrobní postup	54
5.4.1 Numerická simulace	55
5.4.2 Nástřihový plán a volba polotovaru	60
5.4.3 Výpočet střížné vůle a střížné síly	62
5.4.4 Výpočet přidržovací, stírací a zvedací síly	63
5.4.5 Volba tvářecího stroje	63
5.5 Konstrukce nástroje	64
6 Závěry	68

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Seznam příloh

Seznam výkresů

ÚVOD [1], [2]

V oblasti vývoje nových osobních i nákladních automobilů je možné zaregistrovat stále silnější důraz na snižování emisí při jejich výrobě, ale převážně i při samotném provozu. Tato skutečnost nutí současné výrobce k neustálému vývoji prvků karoserie a podvozků. Kované a odlévané polotovary jsou nahrazovány součástkami tvářenými ze silných plechů z vysokopevnostních ocelí, které jsou vyprofilovány tak, aby měly nižší hmotnost při zachované tuhosti a pevnosti. Nosné konstrukce automobilů dříve vyráběné z ocelí s nižší mezí kluzu, jsou nahrazovány ocelmi s mezí kluzu vyšší, které ale zároveň mají poměrně dobrou tažnost a jsou vhodné i ke tváření za studena. Poměr pevnosti ku hmotnosti je u těchto ocelí vyšší, čímž je dosaženo úspory hmotnosti. Při snižování hmotnosti však nesmí být snížena bezpečnost vozidla.

Kromě výše uvedeného snižování hmotnosti nelze opomenout konkurenční boj mezi jednotlivými automobilkami, které se snaží nabídnout co nejlepší produkt za co nejnižší cenu. To nutí je samotné i jejich dodavatele k inovacím ve výrobě a hledání nových postupů a metod, které povedou ke snížení celkové ceny produktu případně ke snížení nákladů na jejich výrobu. Díky vysoké sériovosti, lze v automobilovém průmyslu nahrazovat výrobní technologie kování a následné obrábění produktivnějším a levnějším plošným tvářením s případným svařováním, jak je například ilustrováno na obrázku 1.

Pro urychlení vývoje nového komponentu je dnes hojně využíváno počítačových simulací procesu tváření pomocí softwarů na bázi metody konečných prvků. Ještě před samotnou výrobou tvářecích nástrojů dokážou dané počítačové simulace odhalit příčiny vzniku defektů, a je díky nim možné ušetřit spoustu času i financí spojených se zavedením součástí do sériové výroby.



a) *kovaný polotovár*



b) *polotovár vylisovaný*

Obr. 1 *Příklad technologií výroby předního horního ramene osobního automobilu [1], [2]*

1 ROZBOR ZADÁNÍ [3], [4], [5], [6], [7]

Obsah práce je zaměřen na návrh technologie výroby vodícího táhla, které je součástí podvozku nákladních automobilů. Táhlo plní funkci vedení nápravy v podélném směru, aby náprava udržovala stabilní polohu vůči rámu. Při provozu je namáháno na tah-tlak a částečně i na ohyb a krut. Umístění dílu v nápravě nákladního automobilu je znázorněno na obrázku 2.

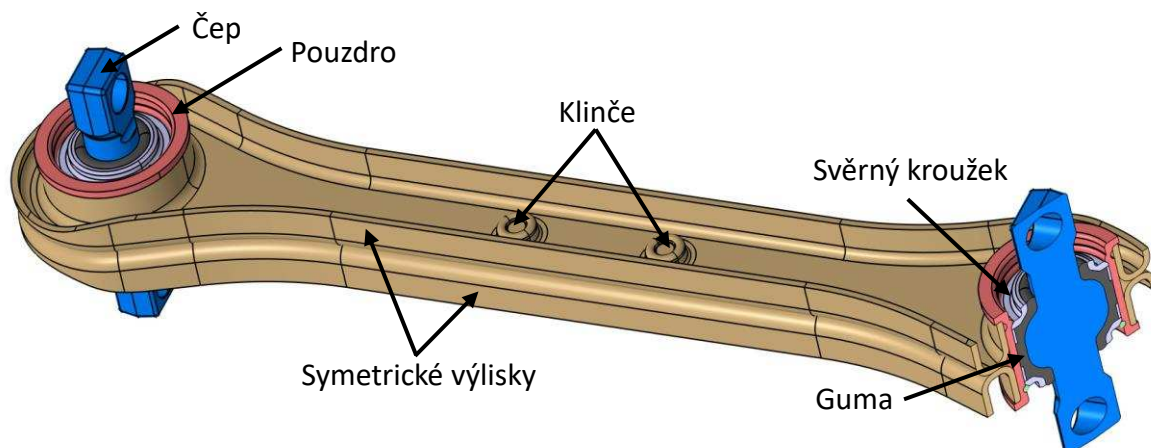


Obr. 2 Umístění vodícího táhla v nákladním automobilu [3], [4], [5]

Ve firmě THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH a.s., sídlící v jihočeských Dačicích, se v současné době vyrábí vodící táhla v několika variacích typu i velikosti. V principu se vždy jedná o zalisované silentbloky v obrobených kovaných nebo odlévaných hlavách, jež jsou propojeny silnostěnnou trubkou. Tento design je velice robustní a má značnou hmotnost. Stykové plochy kovaných i odlévaných hlav se musí před montáží silentbloků a lisováním ocelových trubek obrábět a ke spojení hlav a trubek dochází buď třecím svařováním nebo zalisováním ohřáté trubky na dřív hlavu. S výše uvedenými skutečnostmi souvisí konečná cena produktu, které je dána cenou polotovarů a počtem operací při obrábění a montáži.

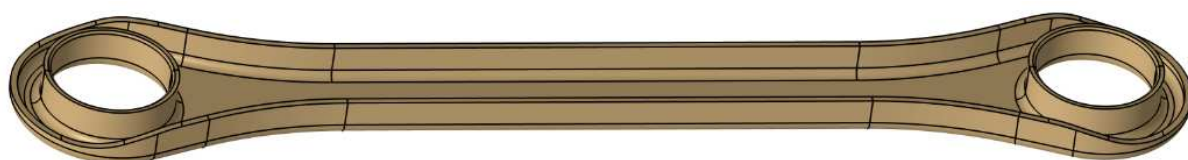
Při návrhu nového konceptu vodícího táhla byly všechny tyto skutečnosti zohledněny a byl tak vytvořen nový design, využívající dva symetrické díly vylisované za studena z plechu. Spojení symetrických dílů v řezu tvoří I profil. Nově navržený design R&D týmem společnosti včetně popisu součástí je na obrázku. 3. Uvažuje se, že spojení výlisků bude provedeno na třech místech. U prvního spojení, umístěného ve střední části táhla, bude využíváno technologie klinčování, která provádí spoj pomocí speciálního tvárníku a tvárnice, jenž při sevření dokážou v materiálu vytvořit pevný tvarový zámek, zabráňující pohybu součástí vůči sobě. Klinčované spoje dosahují vyšších pevností než bodové svary. Další dvě spojení budou realizována díky tvarově uzpůsobeným ocelovým pouzdrům gumových silentbloků, která jsou zalisována do olemovaných děr ve výliscích. Ke spojení symetrických dílů se uvažuje i možnost svařování, použitý materiál by tedy měl být svařitelný.

Tato diplomová práce není zaměřena na výrobu celé sestavy vodícího táhla, ale pouze na výrobu jejího subkomponentu, u kterého se plánuje využití technologie lisování z plechu za studena. Jeho CAD model, hlavní rozměry a tolerance je možné vidět na obrázku 4.

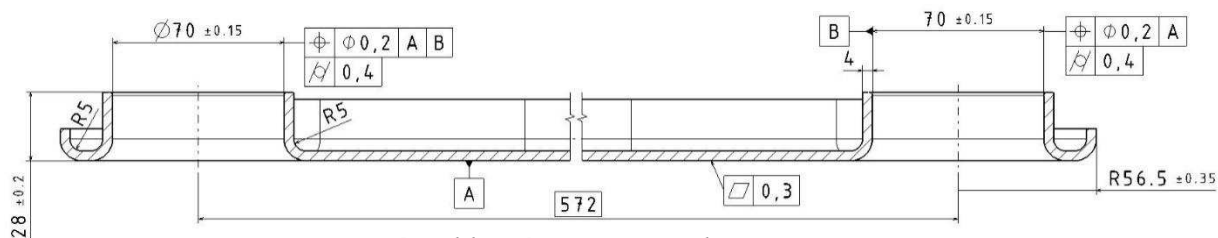


Obr. 3 Koncept nového designu vodícího táhla [5]

Jelikož je součástka poměrně značně dynamicky namáhána, bylo nutné zvolit adekvátní materiál s dobrou pevností z hlediska použití, ale zároveň dobrou tváritelností z hlediska výroby.



a) CAD model



b) hlavní rozměry a tolerance

Obr. 4 Subkomponent vodícího táhla [5]

Vhodnost materiálu pro dané zatížení byla ověřena pevnostním výpočtem metodou konečných prvků v software Abaqus. Kritériem výběru byla požadovaná vyšší mez kluzu, než hodnota maximálního napětí při provozu táhla vynásobená koeficientem bezpečnosti. Vyhovujících výsledků bylo dosaženo se za tepla válcovanou ocelí S420MC (číselné označení 1.0980) dle EN 10149-2 o tloušťce 4 mm. Její chemické složení a základní mechanické vlastnosti jsou znázorněny v tabulce 1.

Tab. 1 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti S420MC. [7]

Chemické složení [hm. %]								
C	Mn	Si	P	S	Al	Nb	V	Ti
max.	max.	max.	max.	max.	min.	max.	max.	max.
0,12	1,60	0,50	0,025	0,015	0,015	0,09	0,20	0,15
Mechanické vlastnosti								
R _e [MPa]			R _m [MPa]			A ₅ [%]		
min 420			480-620			min.19		

Materiál S420MC patří do skupiny vysokopevnostních mikro legovaných ocelí. Vyznačuje se jemnozrnnou feriticko perlitickou strukturou, získanou při termomechanickém válcování. Je vhodný pro tváření za studena a zároveň je díky nízkému obsahu uhlíku a dalších legujících prvků dobře svařitelný. Má vyšší odolnost proti korozi, dobrou houževnatost a odolnost proti únavě. Uplatnění nachází například ve stavebním průmyslu, v mostových konstrukcích, konstrukcích zemědělských a stavebních strojů, ale běžně se používá pro svoji poměrně vysokou mez kluzu i v automobilovém průmyslu, kde jsou z něj vyráběny například součásti konstrukcí sedaček, ramena náprav nebo výztuhy karoserií.

Výrobní série vodících táhel činí 42 tisíc kusů za rok. Při využití symetrie lisovaných dílů se počet kusů při navrhovaném řešení zdvojnásobí na 84 tisíc kusů ročně a s jejich výrobou se počítá po dobu 7 let. Celkem se plánuje vyrobit 588 tisíc kusů.

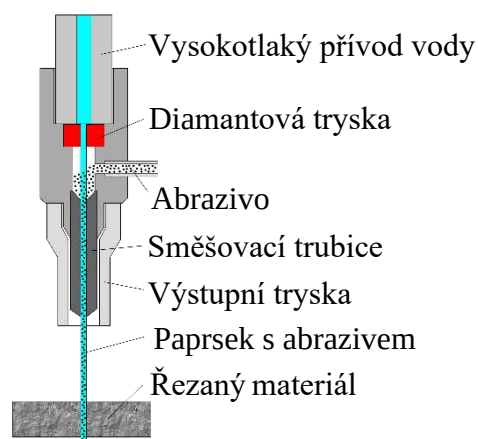
1.1 Varianty řešení

Pro výrobu součástí lze brát v úvahu několik technologií. Ke správné volbě jsou důležité parametry jako dosažitelná přesnost, produktivita, provozní náklady, dostupnost u daného výrobce atd. Z hlediska výrobního postupu je možné výrobu rozdělit na dva hlavní kroky – na přípravu polotovaru a vlastní tvarování součástí.

1.1.1 Příprava polotovaru [8], [9], [10], [11], [12]

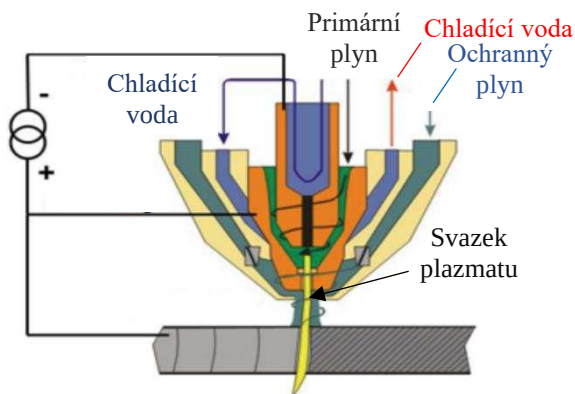
Vstupní materiál je formě válcovaného plechu s tloušťkou 4 mm. Pro výběr vhodné technologie může být uvažován at' už ve formě svitku nebo ve formě tabulí. Nabízí se tyto technologie 2D dělení:

a) řezání vodním paprskem – metoda využívající se k dělení materiálu úzkého paprsku vody vycházejícího z řezací hlavy o vysoké rychlosti a tlaku. K řezání kovových materiálů se zpravidla využívá vodní paprsek s přidavkem abrasiva (nejčastěji australský granát) s určitou zrnitostí, který de facto odbrušuje materiál z místa řezu a vyplavuje ho do vodní lázně pod pracovním prostorem. Při procesu nedochází k tepelnému ani mechanickému ovlivnění základního materiálu a řezná hrana má sice poměrně vysokou drsnost, ale její vzhled je estetický a neobsahuje žádné mikrotrhliny. Základní schéma metody lze vidět na obrázku 5. Touto technologií lze řezat materiály nevodivé, s větší tloušťkou nebo s horší obrobiteľností. Naproti tomu není příliš produktivní a hodí se spíše pro řezání nestandardních materiálů či řezání větších tloušťek.



Obr. 5 Princip řezání vodním paprskem [10]

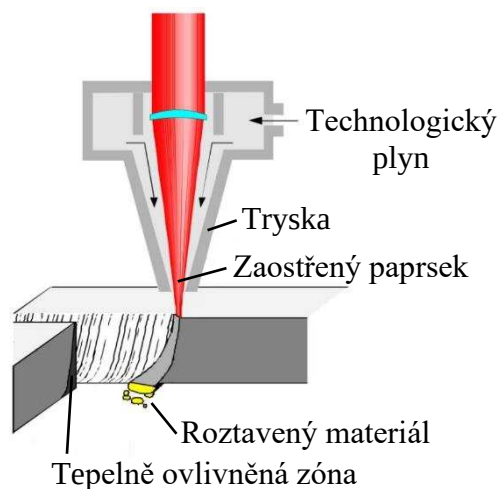
b) řezání svazkem plazmatu – využívá vysoké koncentrace energie v úzkém svazku, kterou předává řezanému materiálu, a tím ho ohřívá až na teplotu tavení. Zjednodušené schéma plazmového řezání je k vidění na obrázku 6. K odstranění nataveného materiálu v řezné spáře dochází prouděním plazmatu. Plazmou lze řezat všechny kovové materiály až do tloušťky přibližně 250 mm, a to včetně vysoce legovaných materiálů nebo barevných



Obr. 6 Schéma řezání svazkem plazmatu [11]

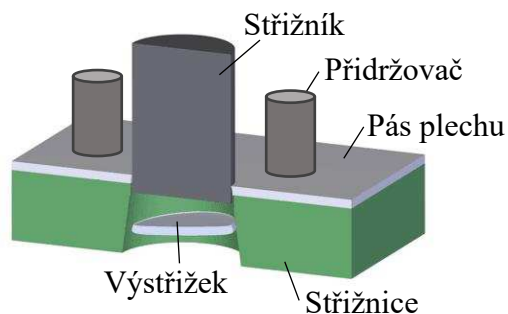
kovů. Výhodou této metody je malá míra vneseného tepla, tedy malá šířka tepelně ovlivněné oblasti. Nevýhodou je naopak vysoký podřez, oblá horní hrana, spotřeba provozních plynů nebo vývin dýmů.

c) řezání laserovým paprskem – dnes frekventovaná technologie tvarového dělení. V principu jde o zaostřený paprsek světla do bodu, ve kterém je vysoká hustota energie čímž se materiál prudce ohřívá. Rychlost ohřevu je větší než rychlost přestupu tepla do okolního materiálu, tím se materiál roztaví, vzniká „key hole“ a řezného účinku je dosaženo kinetikou plynu vycházejícího z trysky. Na obrázku 7 je možné vidět schéma metody. Dnes se často využívá tzv. vláknových laserů, které vynikají svojí vysokou řeznou rychlostí a jsou vhodné pro dělení tenkých plechů. Velkými výhodami laseru je rozměrová a tvarová přesnost řezu, vysoká jakost povrchu řezné plochy a velmi malá tepelně ovlivněná oblast. Jako největší nevýhodu lze označit neschopnost řezat materiály s lesklými povrchy.



Obr. 7 Schéma řezání laserem [12]

d) Stříhání – obrys polotovaru lze zhotovit vystřížením pomocí přesně tvarovaného střížníku a střížnice, viz obr 8. Jednoznačnou výhodou je produktivita vystřihování a nízké provozní náklady, na druhé straně výroba nástrojů je poměrně nákladná a zpravidla použitelná jen pro jeden výrobek. Proto se stříhání vyplácí až při větších výrobních sériích. Pro některé následující operace navíc může být nevýhodou zpevnění v blízkosti střížné hrany, otřep nebo mikrotrhliny na střížné ploše.



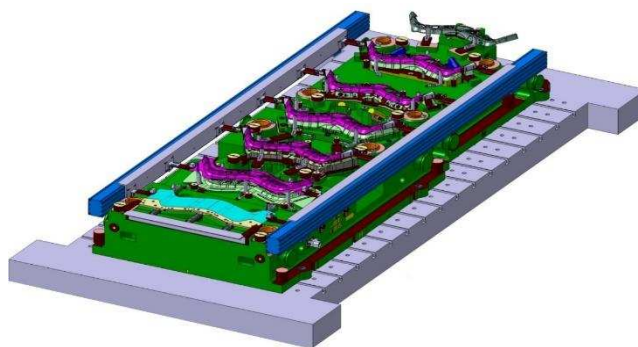
Obr. 8 Schéma stříhání [13]

1.1.2 Tvarování dílce [14], [15], [16], [17]

Vyráběný dílec má největší rozměr 685 mm a tloušťku 4 mm. Lze předpokládat velké tvářecí síly, a proto byly zavrženy technologie tváření s využitím nepevných nástrojů. Reálně proveditelné a efektivní jsou prakticky jen dvě možnosti výroby dílce.

a) Lisování v transferovém nástroji

Transferový nástroj je často využíván při lisování složitějších nebo rozměrnějších součástí například pro karoserie osobních automobilů, při kterých by bylo obtížné nebo nevhodné využití postupového nástroje, viz obr. 9. Další využití nachází při tváření za tepla, kdy je polotovar z plechu nejdříve ohřát v peci a následně manipulátorem vložen do lisovacího nástroje. Též se využívá při lisování tzv. polotovarů na míru, které



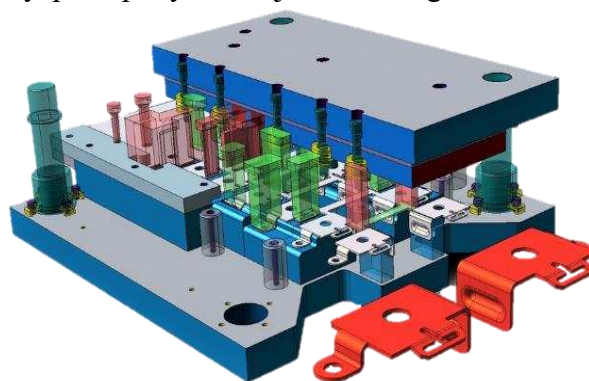
Obr. 9 Spodní část transferového nástroje [14]

jsou laserem svařeny z rozdílných materiálů nebo plechů různých tloušťek. K přenosu mezi jednotlivými operacemi slouží úchopové čelisti pohybující se ve vodící liště.

b) Lisování ve sdruženém postupovém nástroji

Postupový nástroj dokáže z polotovaru, nejčastěji ve formě svítku, vyrobit součást požadovaného tvaru v několika operacích. Může v něm být využíváno hned několik tvářecích technologií najednou. Nezbytnou součástí bývá stříhání a na něj navazují technologie jako ohýbání, lemování, tažení, ražení apod. Využití nachází hlavně ve velkosériových výrobcích. Při umístění na rychloběžné lisy dokáže být vysoce produktivní a při dodržování konstrukčních zásad při návrhu nástroje i dostatečně přesný.

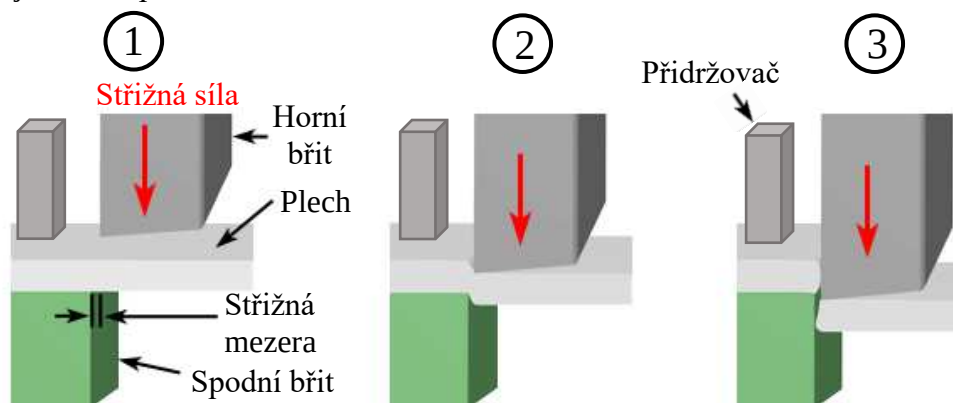
Jelikož je plánováno s výrobou lisovaného symetrického dílce vodícího táhla v počtu 84 tisíc kusů ročně, byl pro návrh výroby zvolen sdružený postupový nástroj. Technologie stříhání a následného lemování je produktivní, je schopna zaručit požadované rozměrové a geometrické tolerance a při dané výrobní sérii už se vyplatí investovat do složitějšího lisovacího nástroje. Polotovaz byl vybrán ve formě svítku, který se může kontinuálně odvíjet a přes rovnací válce vstupovat do nástroje bez zbytečných manipulací a prostojů, jako by tomu bylo u polotovaru ve formě tabulí. Ilustrativní příklad uvedeného řešení postupového sdruženého nástroje je zobrazen na obrázku 10.



Obr. 10 Sdružený postupový nástroj [17]

2 STŘÍHÁNÍ [13], [18], [19], [20], [21], [22]

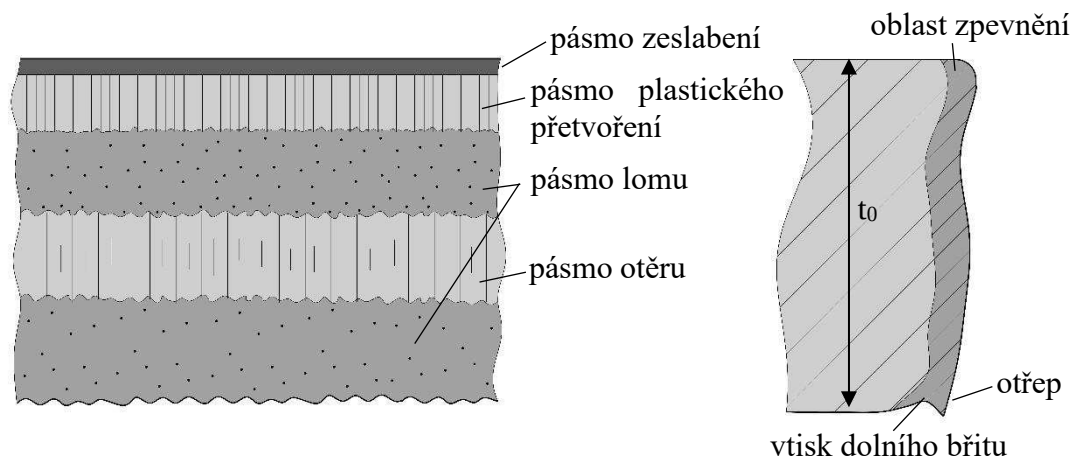
Stříhání je operace, při které má za příčinu křehké porušení materiálu. K lomu dochází nejprve v ohnisku plastické deformace a trhliny se dál šíří k okrajům plechu. Střížná plocha je charakteristická svým tvarem, tzv. „S“ křivkou. K oddělení materiálu dochází působením dvou protilehlých břitů, jenž vytvářejí v plechu smyková napětí, a při překročení jejich kritické hodnoty dojde k porušení. Základní princip stříhání lze rozdělit do třech základních fází. Takto ho znázornit je možné pomocí obrázku 11.



Obr. 11 Schéma fází stříhu [13]

Aby nedošlo ke vzpříčení plechu mezi břity, musí být plech shora držen přidržovací silou. Před samotným porušením dochází v prvním kroku k dosednutí horní střížné hrany na povrch plechu a v něm s dalším posunem horního břitu dochází k pružným deformacím. V závislosti na materiálu a jeho mechanických vlastnostech nabývá elastické vniknutí hodnot mezi 5 a 8 % tloušťky plechu. V další fázi je již překročena mez kluzu, dochází ke zplastizování materiálu a tloušťka plechu se zmenšuje. Plastické zatlačení dosahuje hodnot mezi 10 a 25 % tloušťky.

Při dalším pohybu horního nástroje dále narůstá hodnota smykových napětí a při překročení meze pevnosti ve smyku se v ohnisku deformace začínají tvořit mikrotrhliny a vznikne tzv. nástrih. Trhliny se dále šíří, až dojde k celkovému odtržení. Rychlost, s jakou se materiál oddělí, závisí na jeho tvrdosti a křehkosti. Čím měkčí a houževnatější je, tím později k oddělení dojde a hloubka vniku střížné hrany může překročit i 60 %. Stříhací operace doprovází nežádoucí jev. V určité vzdálenosti od střížné hrany vzniká mechanické zpevnění.



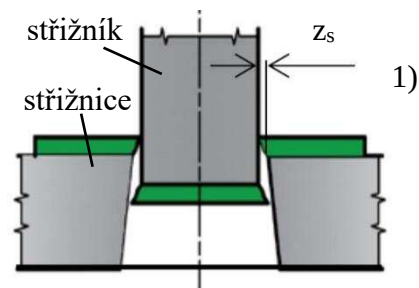
Obr. 12 Vzhled střížné plochy při normální střížné vůli [18]

V literatuře je obvykle uváděno, že tato oblast dosahuje 20 až 30 % tloušťky. To může společně s mikrotrhlinami a ostrými hranami podstatně snižovat lisovatelnost v navazujících operacích.

Vzhled a kvalita střížné plochy významně závisí na hodnotě střížné vůle. Pokud je využito normální vůle, střížná plocha může vypadat podobně jako na obrázku 12. Při klasickém uzavřeném stříhání, kdy je využito střížníku a střížnice, jak je znázorněno na obrázku 13, se střížná mezera z_s pro plechy s tloušťkou větší než 3 mm vypočítá podle následujícího vztahu:

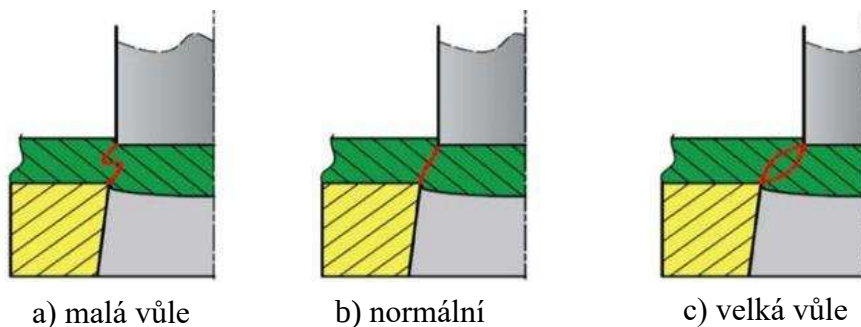
$$z_s = \frac{v_s}{2} = 0,32 \cdot (1,5 \cdot t_0 \cdot c_s - 0,015) \cdot \sqrt{\tau_s} \quad [\text{mm}],$$

kde: v_s – střížná vůle [mm],
 c_s – koeficient určující způsob stříhání
 (0,005÷0,025) [mm]
 t_0 – tloušťka plechu [mm],
 τ_s – mez pevnosti ve stříhu [MPa].



Obr. 13 Uzavřené stříhání [20]

Běžně se střížné vůle pohybují v rozmezí 5 až 10 % tloušťky a optimálně zvolená vůle nezpůsobuje přílišný nárůst střížné síly při dosažení požadované výrobní jakosti. Na obrázku 14 je ilustrováno, jak její velikost souvisí s mechanismem tvorby trhlin.



Obr. 14 Vliv střížné vůle na průběh trhlin [20]

2.1 Stav napjatosti při stříhání [18], [19], [20], [21], [22]

Při uzavřeném vystřihování (střížná hrana tvoří uzavřenou křivku) je předpokládán rovinný stav přetvoření, pro který podmínka plasticity HHM získává následující tvar:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \xi \cdot \sigma_p, \quad (2.2)$$

kde: σ_1, σ_3 – složky hlavního normálového napětí [MPa],

$\xi = 2/\sqrt{3}$ – lodeho součinitel pro rovinný stav přetvoření [-],

σ_p – přirozený přetvárný odpor materiálu [MPa].

Pomocí experimentů bylo ověřeno, že σ_2 je v okamžiku lomu přibližně nulové a zároveň, že $\sigma_3 = -\sigma_1/2$. Dosazením těchto poznatků do podmínky plasticity vznikne vztah:

$$\sigma_1 = \frac{4}{3\sqrt{3}} \cdot \sigma_p \cong 0,77 \cdot \sigma_p \quad [\text{MPa}]. \quad (2.3)$$

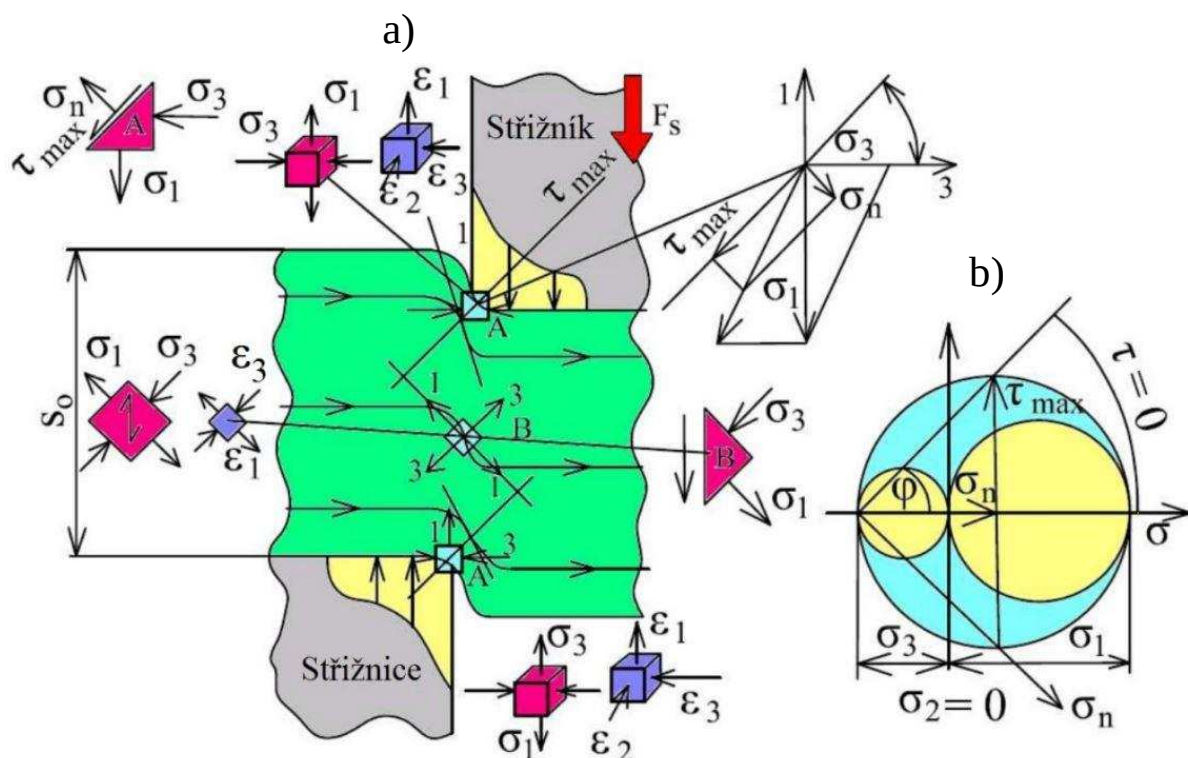
Aby došlo k porušení materiálu, musí σ_p dosáhnout meze pevnosti a složka hlavního napětí σ_1 meze pevnosti ve stříhu. Pak platí následující:

$$\sigma_1 = 0,77 \cdot R_m = \tau_s, \quad (2.4)$$

kde: R_m – mez pevnosti v tahu [MPa].

Ve většině literatur se hodnota meze pevnosti ve stříhu pro ocel zaokrouhluje na $0,8 R_m$ a je též nazývána jako střížný odpor.

Stav napjatosti je znázorněn na obrázku 15. Tím, jak se střížník zanořuje do plechu, je materiál v oblasti břitů natahován a zároveň vytlačován do stran. Mezi břity střížníku a střížnice jsou znázorněny vrstevnice, díky nimž je možné lépe znázornit, co se v deformovaném materiálu děje. Vrstevnice jsou natahovány, mění křivost a vzdálenost mezi nimi se zmenšuje. V bodě A vzniká největší tahové napětí σ_1 a přibližně poloviční σ_3 . U stříhání větších tlouštěk se dá říct, že v tomto místě nastává přibližně rovinný stav napjatosti. Protože je však střední napětí nenulové a nenulová je i složka deviátoru napětí D_{σ_2} , nastává v bodě prostorový stav



a) stav napjatosti a přetvoření, b) Mohrova kružnice hlavních napětí

Obr. 15 Stav napjatosti a přetvoření při běžném uzavřeném stříhání [20]

přetvoření. Z vektorového součtu složek hlavních napětí σ_1 a σ_3 a z Mohrových kružnic je vidět, jak kolmo na rovinu maximálního smykového napětí působí kladná normálová složka σ_n . Ta se po nástřihu zapříčiňuje o rozevírání vzniklých trhlin a podporuje jejich další šíření. Křivost vrstevnic se směrem do středu plechu mění. S ní se mění i rovina maximálních smykových napětí $\tau_{\max}$ a vzniká charakteristická S křivka na střižné ploše. Směrem do středu se mění i poměr složek hlavního napětí σ_1 a σ_3 a v bodě B se jejich absolutní hodnoty rovnají. Zde je dosaženo podmínek čistého stříhu, kdy $\sigma_n=0$.

2.2 Střižná síla a práce [18], [19], [20], [21], [22]

Velikost střižné síly je závislá na mnoha faktorech. Mezi nejvýznamnější patří především stříhaný materiál, geometrie výstřižku nebo střižná vůle. Střižnou sílu je potřeba znát pro správnou volbu stroje a pro dimenzování nástrojů. Její charakteristický průběh lze vidět na obrázku 16. Snadno se v něm dají rozeznat jednotlivé fáze stříhu. Hodnota síly nejprve strmě narůstá při elastickém a plastickém vniknutí do materiálu v důsledku jeho zpevnění a po dosažení maxima při okamžiku překročení meze pevnosti ve stříhu dochází k mírnému poklesu vlivem tvorby prvních trhlin. K významnému poklesu dojde až při úplném porušení a oddělení výstřižku od základního materiálu. Ani potom ale hodnota nespadne na nulu, jelikož vypadnutí odděleného materiálu pořád brání ořez vzniklých ploch ve stavu „S“ křivky. S využitím vztahu (2.3) lze stanovit velikosti střižné síly F_s při děrování a vystřihování podle následujícího vztahu:

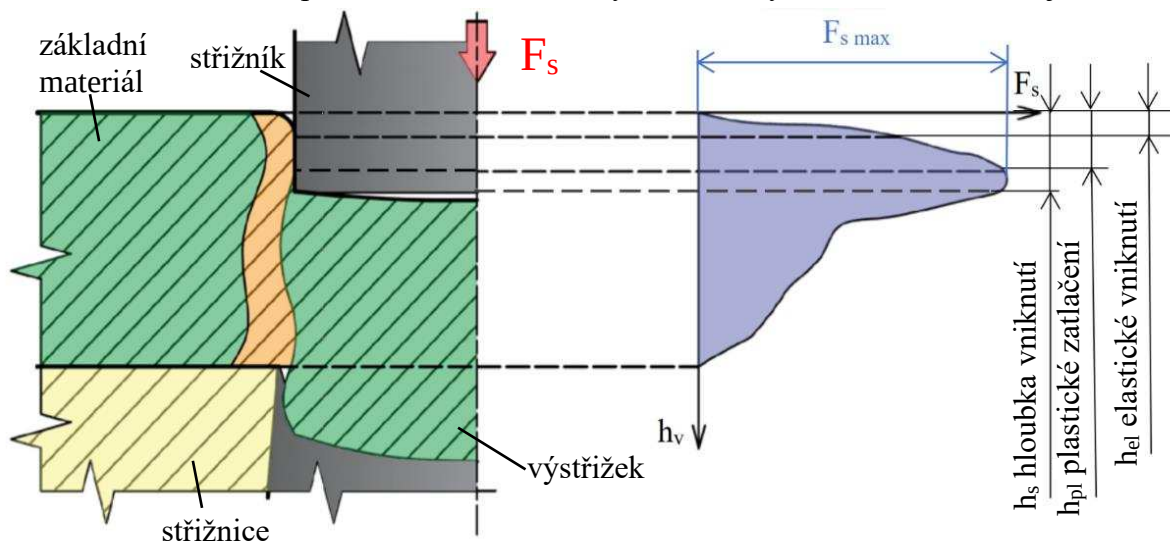
$$F_s = n_s \cdot L(t_0 - h_s) \cdot \tau_s \quad [\text{N}], \quad (2.5)$$

kde: n_s (1,0÷1,3) – koeficient vlivu vnějších podmínek [-],

L – délka křivky stříhu [mm],

h_s – hloubka vniknutí střižné hrany [mm].

Tento vztah v zásadě platí pro děrování, kdy poměr průměru díry „ d “ ke tloušťce plechu t_0 je větší než 1. V opačném případě totiž napětí ve stříhu zásadně roste. Koeficient „ n “ zahrnuje vliv otupení střižných hran, nerovnoměrnost tloušťky materiálu a nerovnoměrnost napjatosti. Střižnou sílu lze snížit například skloněním střižných hran, aby ke stříhu nedošlo najednou, ale



Obr. 16 Průběh střižné síly [20]

postupně v závislosti na zdvihu střižníku. V takovém případě je však nutné počítat s deformovanými výstřižky.

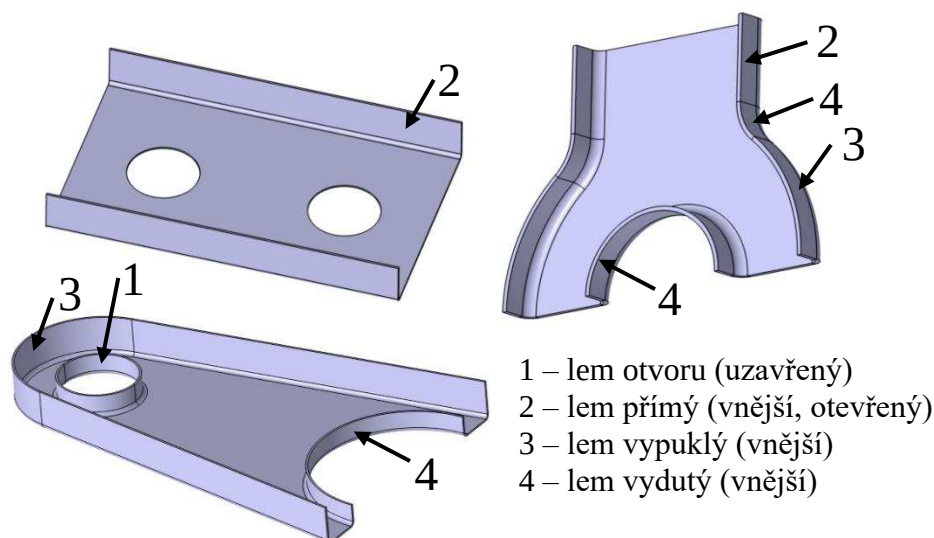
Pro stříh mezi rovnoběžnými hranami můžeme střižnou práci „ A_s “ definovat jako plochu pod křivkou v závislosti střižné síly na dráze střižníku, viz následující vzorec:

$$A_s = F_{smax} \cdot t_0 \cdot \lambda \cdot 1000 \quad [\text{J}], \quad (2.6)$$

kde: λ je součinitel plnosti diagramu F_s-h_v [-].

3 LEMOVÁNÍ [18], [20], [21], [22], [23], [24], [25]

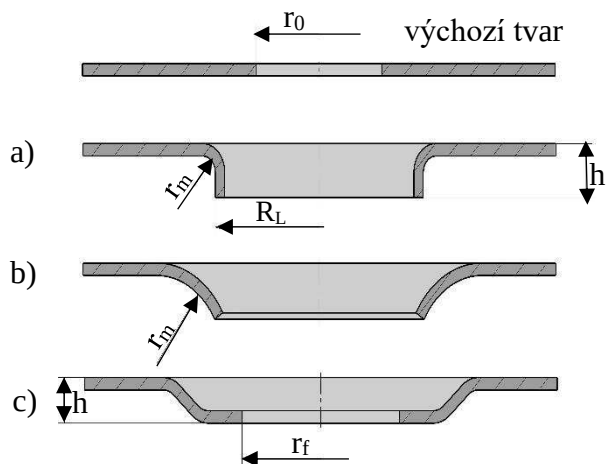
V dnešní době trendů snižování hmotnosti vozidel, spoření množství spotřebovaného materiálu a zlevňování výroby je lemování velice progresivní technologií plošného tváření. Dokáže být při použití vhodných nástrojů vysoce produktivní a vzhledem k užitným vlastnostem vyráběné součásti i nesmírně efektivní. Díky lemování je možné dosáhnout významného nárustu tuhosti a vzpěrné stability součásti zvýšením kvadratického momentu průřezu nebo při zachované tuhosti značně snížit hmotnost například oproti odlévaným nebo kovaným dílům. Lemy mohou mít různé tvary i užití. Významné uplatnění nachází v leteckém a automobilovém průmyslu. Příklady typických dílců s lemy lze vidět na obrázku 17.



Obr. 17 Příklady dílců s lemy [24]

Kruhové lemy se často používají u odlehčovacích otvorů a běžné využití nachází při tváření nebo řezání závitů. Nejprve se díra olemuje, aby vznikla jakási opěrná plocha pro následnou tvorbu závitu. To se často provádí v postupovém nástroji, ve kterém je tvářecí závitník umístěn na pohybovém šroubu. Šroub převádí přímočarý pohyb beranu lisu na rotační pohyb potřebný pro tváření závitu. Takových závitů se využívá například v konstrukcích sedaček osobních automobilů. Lemované otvory se též používají jako průvlaky pro různé kabeláže, jež částečně chrání proti prodření. Příklady kruhových lemů jsou znázorněny na obrázku 18. Tvar podle 18a vznikne při mezeře mezi lisovníkem a lisovnicí o velikosti tloušťky plechu, 18b při mezeře větší než tloušťka plechu a 18c ukazuje tzv. miskový lem. Obvodové lemy mohou sloužit jako opěrné plochy pro následné operace svařování či pájení nebo mohou sloužit jako mechanický spoj, jak je tomu například u spojování spodní strany kapoty s výztužnou konstrukcí.

Lemování není z hlediska výroby nikterak složité. Pro jednoduché přímé otevřené lemy se dá využít ohraňovací lis. Většinou se jednoduché a málo zakřivené lemy nebo lemy otvorů provádí za pomoci pevných nástrojů na tvářecích lisech. Lisovnice je opatřena zaoblenou hranou a při lemování nedochází k přemísťování materiálu do ohniska deformace, tvarování probíhá na úkor ztenčování plechu. U více zakřivených vydutých a vypuklých lemů nebo v malosériové výrobě se používá

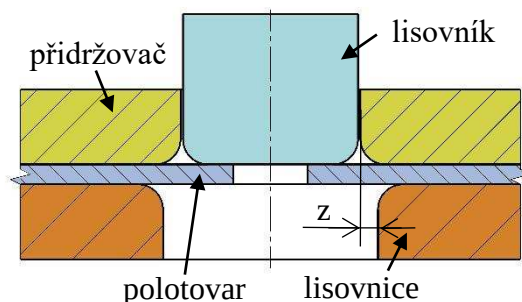


Obr. 18 Příklady tvarů lemu [24]

lisovnice z pryže, polyuretanu nebo s využitím tlaku kapaliny. Dochází při jejím použití k lepšímu „obejmutí“ lisovníku a rovnoměrnějšímu rozložení deformací.

3.1 Lemování otvorů [24]

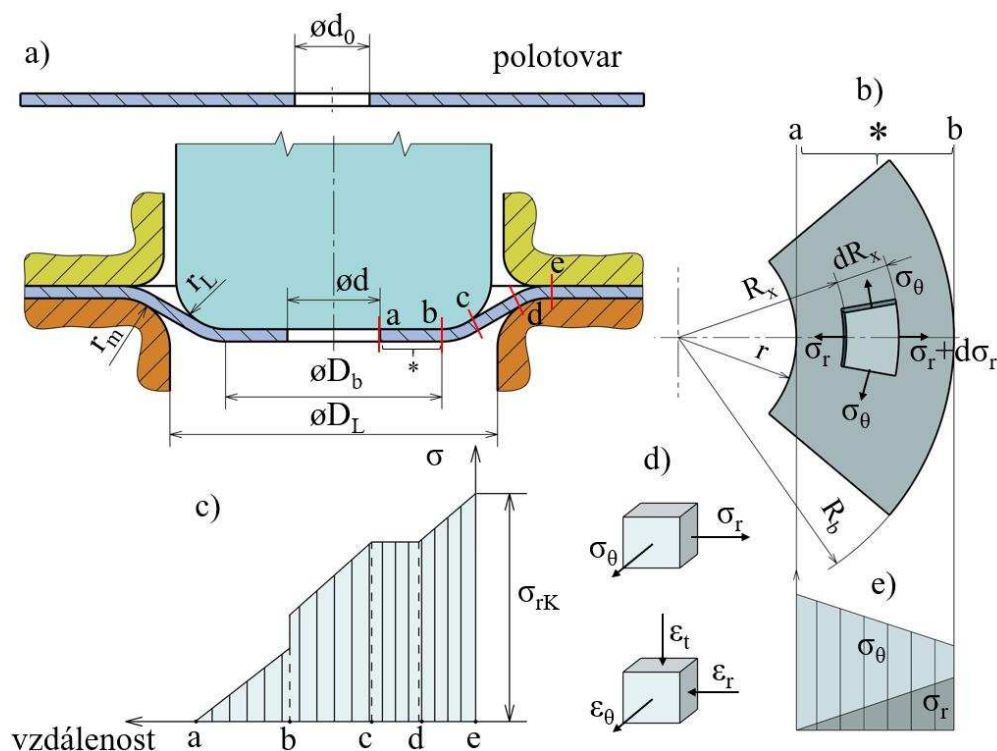
Nejčastěji se k lemování otvorů využívá klasických pevných nástrojů. Většinou jde o kombinaci lisovník-lisovnice-přidržovač, jak znázorňuje obrázek 19. Velikost mezery „z“ mezi lisovníkem a lisovnicí má zásadní vliv na tvar výsledného lemu, viz obr. 18. Lisovníky mohou mít různá zakončení čela. Nejběžnější je rovné čelo se zaoblením hrany, ale používají se i tažníky kuželové nebo s kulovým či traktrixovým zakončením.



Obr. 19 Uspořádání nástrojů [24]

3.1.1 Napěťový stav [24]

Pro tuto diplomovou práci je podstatný válcový lem, proto mu bude věnována značná pozornost. V mezifázi je válcový lem tvarově shodný s lemem miskovým a jeho napěťový a deformační stav je znázorněn na obrázku 20. V oblasti pod čelem lisovníku dochází k biaxiálnímu stavu napjatosti, kdy obě složky napětí σ_r a σ_θ jsou kladné. Naproti tomu deformační stav je trojosý. Obvodové přetvoření ε_θ je kladné a zároveň nabývá nejvyšších hodnot, v radiálním směru dochází ke zkracování vláken a přetvoření ε_r je tedy záporné. Ve směru tloušťky plechu je přetvoření ε_t také záporné a dochází tak ke ztenčování. K největšímu ztenčení dochází na hraně otvoru. Mechanismus tvorby lemu probíhá tak, že se při pohybu lisovníku plech ohýbá jak kolem poloměru lisovnice r_m , tak kolem poloměru lisovníku r_L . Na lisovnici se nabaluje, kdežto po lisovníku se smýká. Současně dochází ke zvětšování díry z ϕd_0 na obecný ϕd . Ohnisko deformace ležící mezi body „a“ a „b“ se přesunuje směrem k poloměru lisovníku r_L , kde dochází k ohybu za působení pásového tření.



Obr. 20 Lemování otvoru [24]

Aby bylo možné stanovit sílu lemování, nejdříve se musí určit vztah pro radiální napětí σ_r v ohnisku deformace. Zde bude uveden zjednodušený přístup bez zahrnutí vlivu zpevnění, ohybu a dalších faktorů. Do výsledného vztahu není zaveden ani vliv geometrie nástrojů a mezery „z“. Základem pro řešení je sestavení diferenciální rovnice rovnováhy napětí na nekonečně malém elementu dle obrázku 20b:

$$\frac{d\sigma_r}{dR_x} = \frac{d\sigma_r - \sigma_\theta}{R_x}. \quad (2.7)$$

V mezikruží pod čelem lisovníku je $\sigma_r < \sigma_\theta$, a proto je možné použít zjednodušenou podmínku plasticity $\sigma_\theta = \sigma_k$. Dosazením předešlého vztahu a zavedením okrajové podmínky na hraně otvoru, kde při $R_x = r$ je $\sigma_r = 0$ získáme rovnici:

$$\sigma_r = \sigma_k \left(1 - \frac{r}{R_x}\right) \quad [MPa], \quad (2.8)$$

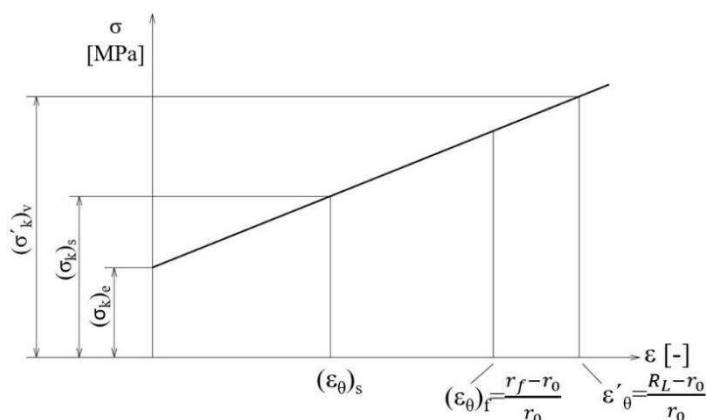
kde: σ_k – mez kluzu [MPa].

Tento vztah zohledňuje jen stav napětí v mezikruží mezi body „a“ a „b“ při přechodné fázi, kdy „r“ ještě nedosáhne konečné hodnoty r_f , jak znázorňuje obrázek 20a. Příspěvek do celkového deformačního odporu od radiálního napětí $\tilde{\sigma}_r$ bez uvážení ohybu přes hranu lisovníku má potom následující podobu:

$$\tilde{\sigma}_r = (\sigma'_k)_v (1 - r_0/R_L) \quad [MPa], \quad (2.9)$$

kde: $(\sigma'_k)_v$ – hodnota přirozeného přetvárného odporu pro max. roztažení otvoru viz obr. 18a a obr. 21 [MPa].

V blízkosti otvoru je při roztahování velice podobný stav napjatosti jako při tahové zkoušce, a proto lze brát $(\sigma'_k)_v$ jako hodnotu přirozeného přetvárného odporu (dále jen PPO) odpovídající maximálnímu přetvoření na okraji lemu pro případ, kdy je lem dokončen a obecný poloměr „r“ (polovina ϕd) dosáhne hodnoty R_L . Konkrétní hodnotu $(\sigma'_k)_v$ můžeme získat například z lineárně aproximované křivky PPO získané z tahové zkoušky, viz obr. 21. Hodnota $(\sigma_k)_s$ z obr. 21 odpovídá střednímu PPO při tvorbě miskového lemu, kdy se poloměr r_0 mění na poloměr r_f (obr. 18). $(\sigma_k)_s$ je střední hodnota mezi extrapolovanou mezí kluzu $(\sigma_k)_e$ (což je PPO při začátku lemování) a hodnotou PPO odpovídající deformaci při konci lemování $(\epsilon_\theta)_f$.



Obr. 21 Napětí a deformace na hraně otvoru [24]

U válcového lemu je nutné brát v úvahu ještě příspěvek radiálního napětí $\tilde{\sigma}_o$ od ohybu kolem zaoblení lisovnice r_m bez uvažování zpevnění:

$$\tilde{\sigma}_o = \sigma_k \cdot \frac{t_0}{2r_m - t_0} \quad [MPa], \quad (2.10)$$

Pak komplexní radiální napětí $(\tilde{\sigma}_r)_K$ pro lisovník s rovným čelem lze vypočítat podle:

$$(\tilde{\sigma}_r)_K = \tilde{\sigma}_r \cdot e^{\mu\alpha_0} + \tilde{\sigma}_o \quad [MPa], \quad (2.11)$$

kde: μ – součinitel smykového tření [-]
 α_0 – úhel opásání lisovníku [rad].

3.1.2 Deformační stav a vliv kvality plochy otvoru a přidržovač na jeho parametry [24]

Jak již bylo zmíněno výše, při lemování nastává trojosý stav přetvoření. Hlavní přetvořením je obvodové a největší hodnoty nabývá na hraně otvoru, kde dochází k podmínkám velice podobným jednoosé napjatosti. Na hraně platí $\sigma_r/\sigma_\theta=0$ a můžeme říct, že $\varepsilon_t = \varepsilon_r = -0,5\varepsilon_\theta$. S využitím znalostí z teorie plasticity a vztahy mezi napětími a přírůstky deformací při rotačně symetrických operacích lze určit vztah pro minimální hodnotu tloušťky na hraně otvoru t_{min} jako:

$$t_{min} = t_0 \cdot \sqrt{k_L} \quad [mm], \quad (2.12)$$

kde: k_L – koeficient lemování ($k_L = r_0/r$) [-].

Ke snížení pravděpodobnosti vzniku krčku a potažmo trhliny na hraně otvoru je doporučováno, aby hodnota σ_θ nepřerostla hodnotu homogenní tažnosti z tahové zkoušky. Pro některé aplikace však vytvoření krčku v blízkosti hrany lemu není považováno za defekt. Koeficient lemování je svázán s obvodovou deformací následujícím vztahem:

$$\varepsilon_\theta = \frac{r - r_0}{r_0} = \frac{1 - k_L}{k_L} \quad [-], \quad (2.13)$$

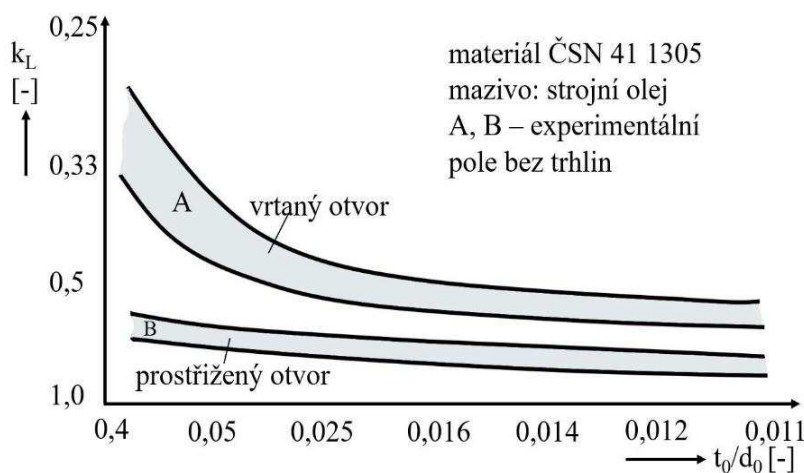
a ten upravit na:

$$k_L = \frac{1}{1 + \varepsilon_\theta} \quad [-]. \quad (2.14)$$

Na konečnou hodnotu velikosti otvoru má dominantní vliv kvalita povrchu otvoru. Zásadní je, jakou technologií je zhotoven a z pravidla platí, že čím lepší je kvalita otvoru, tím může být dosaženo vyšších hodnot k_L . Dalšími činiteli ovlivňujícími koeficient lemování jsou především mechanické vlastnosti materiálu a dále pak geometrie lemu (výška, poloměry), kontaktní tření, druh lemu, stav napjatosti nebo faktory spojené s tloušťkou plechu, tvarem lisovníku apod.

• Vliv kvality plochy otvoru

Je důležité, aby plocha hrany byla velmi čistá, to znamená bez zátrhů a drobných trhlinek. Ty jsou typické zejména pro prostřížené otvory. U těch se zároveň objevuje lokální zpevnění blízko střížné plochy, které částečně vyčerpává zásobu plasticity pro následnou operaci lemování. Vliv má i relativní tloušťka t_0/d_0 ve spojitosti s koeficientem k_L .



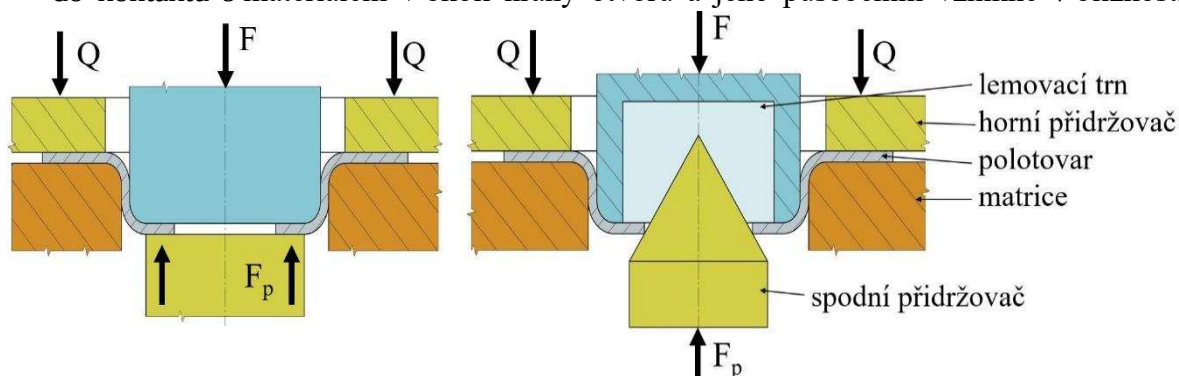
Obr. 22 Závislost k_L na t_0/d_0 se zohledněním kvality plochy otvoru [24]

Uvedené skutečnosti se dají ilustrovat obrázkem 22. Na něm můžeme vidět, že vrtané otvory jsou pro lemování otvorů z hlediska dosažitelných deformací mnohem vhodnější než otvory vystříhnuté. Výhoda vrtaných otvorů se u materiálu ČSN 41 1305 umocňuje hlavně při hodnotách t_0/d_0 vyšších než 0,025. Na druhou stranu při výrobě lemů na součástkách s vysokou sériovostí je vrtání otvorů téměř nepřípustné. Zlepšení jakosti povrchu však může přinést i příprava otvoru řezáním vodním paprskem, svazkem plazmatu, laserovým paprskem nebo elektroerozivním drátovým řezáním. Při lemování

malých otvorů bývá obecně dosahováno větších stupňů deformace. Ty lze ještě zvýšit ohřevem, pomocí kterého může obvodová deformace vzrůst až o 50 %.

- **Vliv spodního přidržovače**

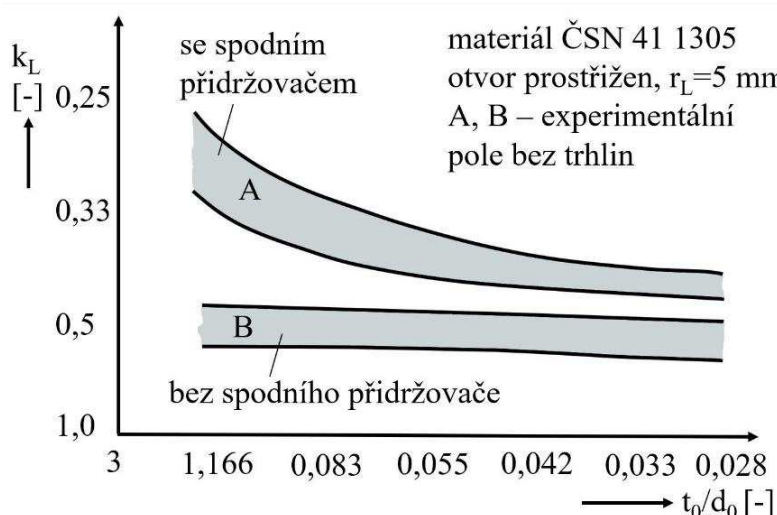
Ke zvýšení výrobních limitů může přispět použití spodního přidržovače. Ten se dostává do kontaktu s materiálem v okolí hrany otvoru a jeho působením vznikne v blízkosti



Obr. 24 Lemování otvoru s využitím spodního přidržovače [24]

otvoru přidavné tlakové napětí a příznivější stav napjatosti. Zejména se zvýší deformace v radiálním směru ϵ_r . Na obrázku 23 je možné vidět dva z možných tvarů přidržovačů.

První se opírá celou plochou o dno lemu a druhý svojí kuželovou částí tlačí přímo na plochu otvoru, a díky tomu zlepšuje i stav povrchu střížné plochy. Na obrázku 24 je graf dosažitelných hodnot k_L v závislosti na t_0/d_0 s uvažováním použití spodního přidržovače. Spodní přidržovač má příznivý vliv srovnatelný s lemováním vrtaných



Obr. 23 Vliv spodního přidržovače na hodnotu k_L [24]

otvorů. Největšího zlepšení a největšího snížení pravděpodobnosti výskytu trhlin v průběhu lemování je možné dosáhnout kombinací lemování vrtaného otvoru za současného použití spodního přidržovače.

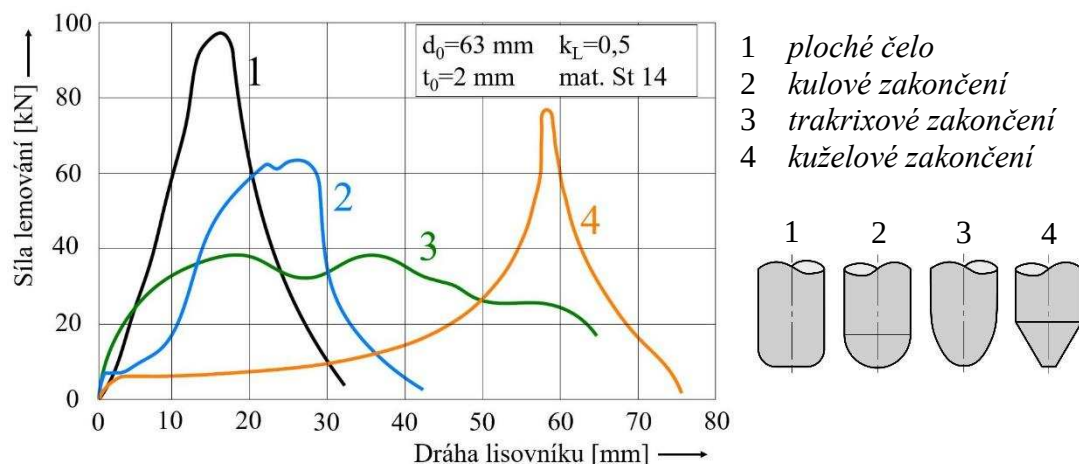
3.1.3 Stanovení síly [24], [25], [26]

Při výrobě válcových lemů s využitím lisovníku s plochým čelem dochází v první fázi k vytvoření miskového lemu, jak ilustruje obrázek 20a, a až po jeho zániku se tvoří finální geometrie válcového lemu. Příspěvek potřebné tvářecí síly od ohybu a pásového tření kolem hrany lisovníku r_L se s pohybem nástroje směrem dolů snižuje, ve výpočtu není vůbec zahrnut. Na určení velikosti síly pro výrobu válcového lemu má zcela zásadní vliv radiální napětí charakterizováno obvodovou deformací ϵ'_θ , kdy se materiál z poloměru r_0 roztahuje až na poloměr lisovnice R_L . Celkové lisovací síle F_L pro výrobu válcovacího lemu lisovníkem s plochým čelem pak odpovídá následující vztah:

$$F_L = (\tilde{\sigma}_r)_K \cdot 2\pi(R_L)_S \cdot t_0 \quad [N], \quad (2.15)$$

kde: $(R_L)_S$ – střední poloměr válcového lemu (viz obr. 18a) [mm].

Na průběh síly v závislosti na dráze pohybu lisovníku má značný vliv tvar zakončení čela lisovníku. Pro zhotovení válcových lemuů je z hlediska zatížení stroje nejméně vhodné zakončení válcové. Jako výhodnější se jeví zakončení kulové nebo kuželové a nejlepší variantou je tzv. traktrixové zakončení. To je způsobeno tím, že u lisovníku s plochým čelem

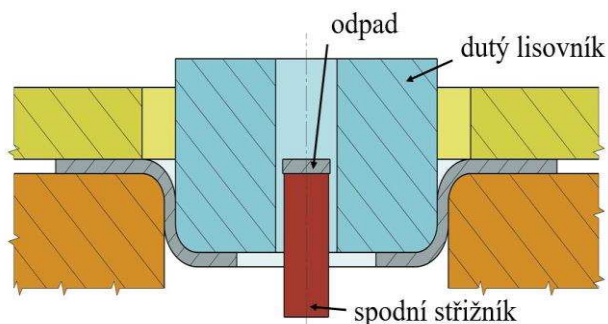


Obr. 25 Průběhy sil pro různá zakončení lisovníků [24]

dochází k ohybu kolem hrany lisovnice r_m i kolem hrany lisovníku r_L , zatímco u ostatních zakončení dochází pouze k ohybu kolem hrany lisovnice za současného rozšiřování otvoru postupným zanořováním nástroje. Příklad průběhu sil v závislosti na dráze lisovníku pro jednotlivé tvary zakončení jsou znázorněny na obrázku 26. Nejnižší síly jsou zaznamenávány u lisovníků s traktrixovým zakončením, jehož tvar je na stejném obrázku schematicky znázorněn. Z obrázku je zároveň vidět, že lisovník s kuželovým zakončením potřebuje nejdelší dráhu. Ta někdy může být omezena například zdvihem stroje a nelze tak toto zakončení zvolit. Naopak nejkratší dráhy je dosahováno s lisovníkem s válcovým zakončením. Všechny tvary lisovníků musí být opatřeny dostatečně velkou válcovou plochou, která kalibruje průměr lemu v poslední fázi jeho tvorby. Z hlediska výše výrobní ceny a složitosti výroby bývají navzdory svým nesporným výhodám traktrixové lisovníky nahrazovány kuželovými.

3.1.4 Přípravky, nástroje a rozměry polotovaru [24], [25], [26]

Ve velké míře se lemování otvorů provádí ve sdužených nástrojích. V jednom zdvihu je provedeno stříhání a následně lemování. Tento případ je schematicky znázorněn na obrázku 27. Sdužené nástroje jsou zabudovávány do postupových nástrojů, u kterých je lemování otvorů jen dílčí operací v komplexním výrobním procesu. Při lemování tenkých plechů a malých otvorů se dá použít ostrý kuželový trn, který plech nejdříve propíchne a pak olemuje. U velkých otvorů nebo silných plechů se dá použít přípravek s lemovací hlavici s více trny, které jsou rozmístěny tak, aby při rotaci a současném lineárním pohybu hlavice jejich povrch opisoval válec o požadovaném vnitřním průměru lemu. Ke kontaktu mezi nástrojem a plechem dochází teoreticky jen v bodech a ohniska deformace jsou pouze lokální a sníží se tvářecí síly.



Obr. 26 Sdužený nástroj [24]

Průměr otvoru se nedá určit pouhým rozvinutím výsledného tvaru lemu. Dal by se sice použít zákon zachování objemu, ale pro to bychom potřebovali znát funkci, s kterou se mění tloušťka plechu v závislosti na pohybu lisovníku. Kvůli radiální deformaci a působení dalších činitelů

ovlivňujících konečnou výšku, jako např. mezera mezi lisovníkem a lisovnicí „z“, tvar lisovníku, materiál apod. je nutné použít empirických vzorců. Jeden takový je popsán níže:

$$d_0 = (D_L - t_0) + 0,86r_m + 1,43t_0 - 2h \quad [\text{mm}], \quad (2.16)$$

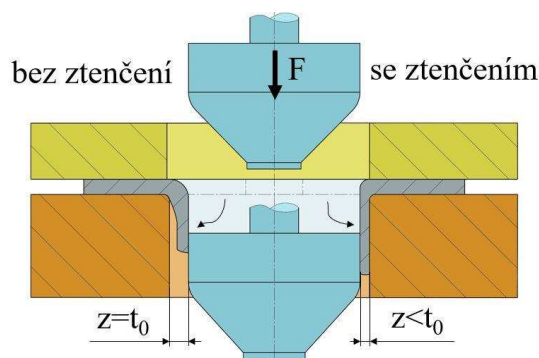
kde: h – výška lemu dle obrázku 18a [mm].

Oblast použití tohoto vztahu je omezena rozsahem „přípustných“ k_L a velkým poloměry zaoblení hrany lisovnice r_m . Konkrétní „přípustné“ hodnoty už nicméně literatura neuvádí. Pro hodně ostré poloměry a těsnou mezeru „z“ lze použít zjednodušený vztah:

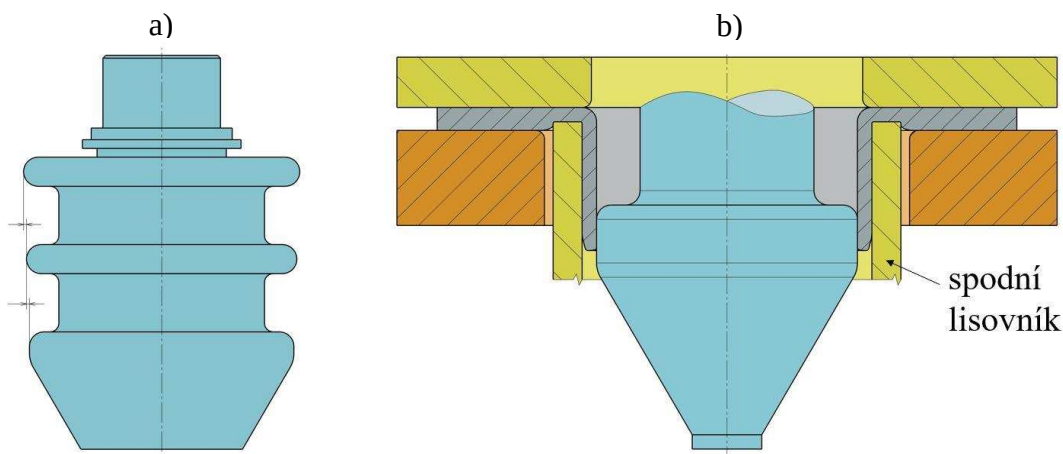
$$d_0 = D_L - 2h \quad (2.17)$$

3.1.5 Lemování se ztenčením stěny [24], [25]

Tato metoda je obecně používána při lemování plechů větších tloušťek nebo malých průměrů lemů. Někdy bývá též nazývána jako protahování. Při běžném lemování bez ztenčení v některých případech nelze dosáhnout požadavků na výšku lemu, proto se přistupuje k lemování se ztenčením. Podstatou metody je, že mezi lisovníkem a lisovnicí je menší mezera než tloušťka plechu, jak je znázorněno na obrázku 25. Vyšší lem bývá požadován například kvůli potřebě zvětšení styčné plochy pro zalisování jiné součástky, kvůli delšímu vedení pohyblivého protikusu nebo aby bylo možné v lemu vyrobit delší závit. Právě pro přípravnou fázi před výrobou závitů tvářecími se závitníky se protahování používá naprosto běžně hlavně v automobilovém průmyslu v konstrukčních prvcích sedaček nebo karoserie. Složitým úkolem je nastavení optimální vůle „z“. Při její příliš malé hodnotě se v materiálu vytváří smyková napětí, která při kritických hodnotách mohou způsobit ustřížení lemu. Velký vliv má také tvar náběžné hrany a kvalita povrchu lisovníku, součinitel tření, koeficient lemování, a především materiál plechu.



Obr. 28 Lemování se ztenčením stěny [27]



a) alternativní tvar tažníku, b) klasický tvar tažníku

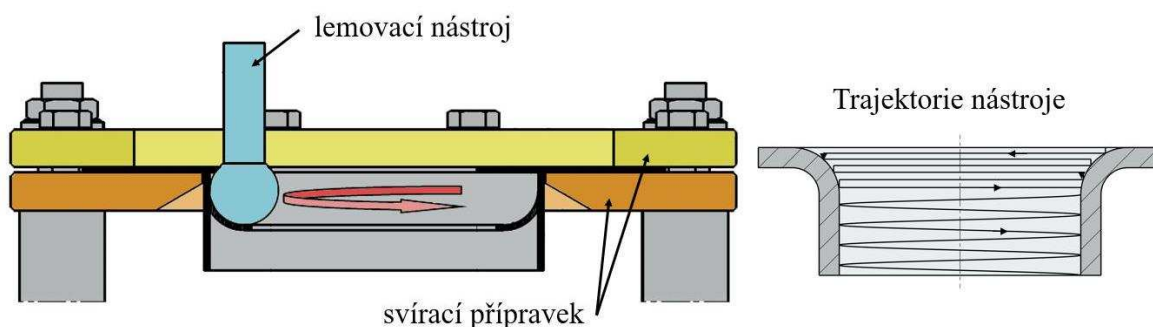
Obr. 27 Tvary tažníků pro lemování se ztenčením stěny [27], [28]

Jako u většiny ostatních technologií plošného tváření platí obecné pravidlo, že nejvyšších hodnot výšky lemu bývá dosaženo s dobře tvářitelnými materiály za studena jako je hliník nebo hlubokotažná ocel. Naopak u vysokopevnostních ocelí vzniká mnoho problémů. V některých případech se z důvodu snížení tvářecích sil, lepšího průběhu deformačního stavu nebo při kalibraci, používá odstupňovaný tažník, který je znázorněn na obrázku 26a. Ke zlepšení výsledků je též možno využít dutý spodní lisovník, viz obr. 26b. Ten dosedne na materiál ještě

před sjezdem hlavního lisovníku a vytlačí část materiálu směrem k díře. Při tomto postupu se na čele lemu tvoří ostrá hrana a ke konci lemu je tloušťka menší než u jeho paty. Aby došlo k zarovnání, používá se ještě další lisovník dosedající na čelo lemu, který materiál spěchuje do roviny.

3.1.6 Jednobodové přírůstkové lemování [29], [30], [31], [32]

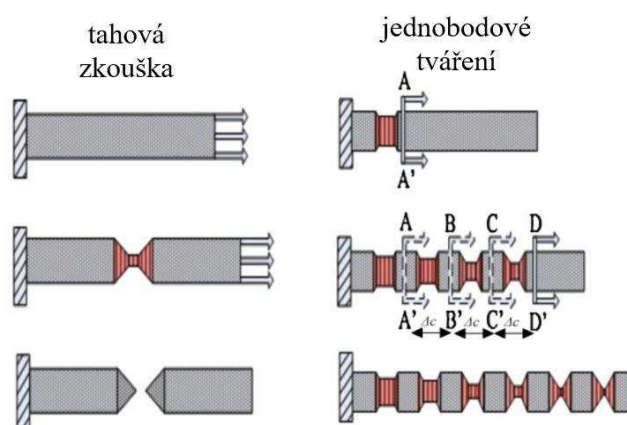
Počátky vývoje metody se datují už do 60. let minulého století, ale intenzivního rozvoje se tato metoda dočkala až po roce 2000. V literatuře bývá zkráceně označována jako SPIF (single point incremental forming). Je jí věnováno velké množství výzkumů a článků, které se zabývají zkoumáním nejrůznějších parametrů nastavení procesu a v současnosti je touto metodou dosahováno opravdu zajímavých výsledků. Díky odlišnému výrobnímu procesu, oproti konvenčnímu lemování pevnými nástroji s vertikálním přímočarým pohybem je možné v materiálu dosáhnout vyšších stupňů přetvoření. Je zde totiž využito jiného mechanismu deformace. Při něm dochází jen k lokálnímu zplastizování materiálu v místě působení nástroje a nástroj tak není namáhán jako u běžných postupů. To vede k nižším nárokům na parametry stroje, jelikož i tvářecí síly jsou nižší. S tím souvisí jedna z největších nevýhod metody a sice potřeba rotačního pohybu nástroje nebo pracovního stolu. Princip jednobodového inkrementálního lemování je dobře vidět z obrázku 29. Pro lepší výsledky je doporučováno,



Obr. 29 Jednobodové inkrementální lemování [29]

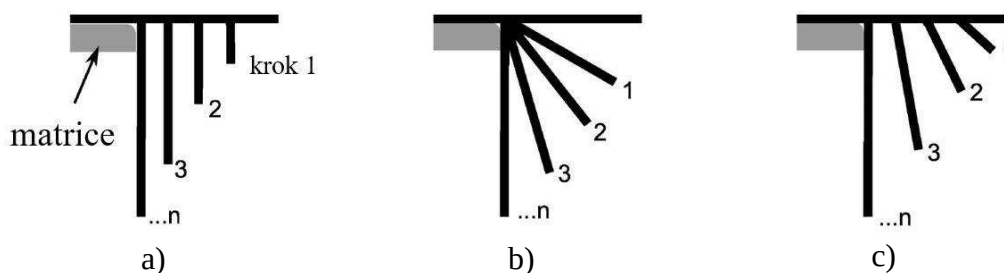
aby se ještě lemovací trn otáčel kolem své osy. Snižuje se tím tření, opotřebení nástroje a celkově se zlepší průběh deformací. Většinou se nástroj upíná do vřetena CNC frézky.

Důvodem, proč je touto metodou dosahováno výrazně vyšších stupňů deformace, je rozmístění plastické deformace do celého lemu, a nikoliv pouze do jednoho místa nebo oblasti, jako je tomu u konvenčních procesů. Tento jev nazval Malhotra a kol. [30] termínem „Noodle theory“, ilustrace viz obrázek 30. V prvním cyklu tváření dojde ke vzniku krčku v určitém místě, ale v dalším cyklu dojde ke vzniku lokálního krčku v místě jiném. Původní krček pojme pouze část deformace následujícího kroku. Po průchodu nástroje je tedy v lemu materiál přetvářen až do oblasti nehomogenních deformací, ale i tak je stále soudržný a k trhlině dochází až při kritické hodnotě přetvoření odpovídající FFL (fracture forming limit) křivce v FLD (forming limit diagram), kterému bude v této práci věnována pozornost později. S touto teorií jsou ovšem vedeny určité polemiky a nelze ji považovat za dogma.



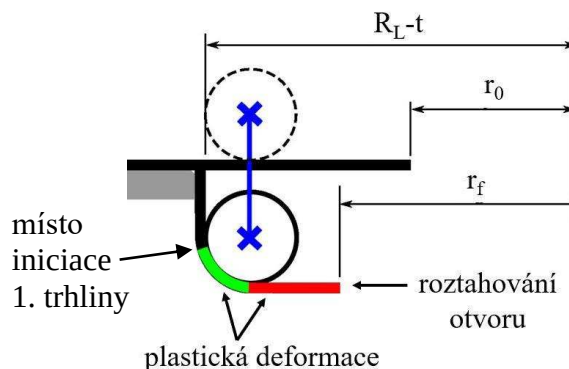
Obr. 30 "Noodle theory" [30]

Proces jednobodového lemování je citlivý na nastavení jednotlivých výrobních parametrů jako je průměr sférického zakončení trnu, jeho axiální krok nebo použití maziva, ale



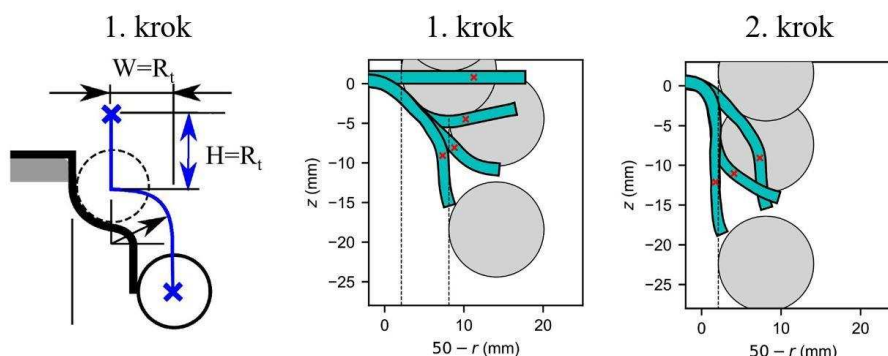
Obr. 31 Strategie vytvoření lemu [31]

nejvýznamněji konečný výsledek ovlivňuje strategie tvorby lemu. Obvykle je zapotřebí více kroků, s nímž je dosahováno nejlepších výsledků. Několik příkladů ukazuje obrázek 31. Jednokroková varianta sice nedosahuje tak dobrých výsledků, ale pro její volbu hraje mnohem kratší výrobní čas. Strategie postupu výroby je zcela zásadní pro rozložení tloušťky v závislosti na lemované výšce. Při nesprávně zvolených parametrech může dojít k trhlině ještě před vyčerpáním potenciálu materiálu. Oproti běžnému lemování se trhlinka neiniculuje na hraně díry, ale v místě působení nástroje, kde dochází k největšímu ztenčení, jak ukazuje obrázek 32. Zde se jedná o jednokrokovou strategii. U více krokových postupů výroby je nejlepších výsledků dosahováno za pomoci strategie z obrázku 31a. Ztenčení stěny je po celé výšce víceméně homogenní, a i přesnost vnitřního průměru lemu je dostačující. Jak už ale bylo zmíněno výše, z hlediska výrobního času se hodí spíše než do reálné výroby pro testování v laboratorních podmínkách.



Obr. 32 Vznik trhliny při jednobodovém inkrementálním lemování [31]

Optimálního postupu se snažili dosáhnout Morales-Palma a kol. [30]. Ve svém výzkumu zvolili kompromis mezi úsporou času a kvalitou lemu a navrhli dvoustupňový postup včetně doporučení nastavení parametrů. Schéma postupu je názorně vidět na obr. 33. Jejich základní myšlenkou je, že při jednokrokovém lemování v určitém okamžiku dochází ke kritickému ztenčení stěny (obr. 32) vlivem velkého radiálního napětí. To je způsobeno velkým objemem



Obr. 33 Modifikace strategie jednobodového lemování otvoru [31]

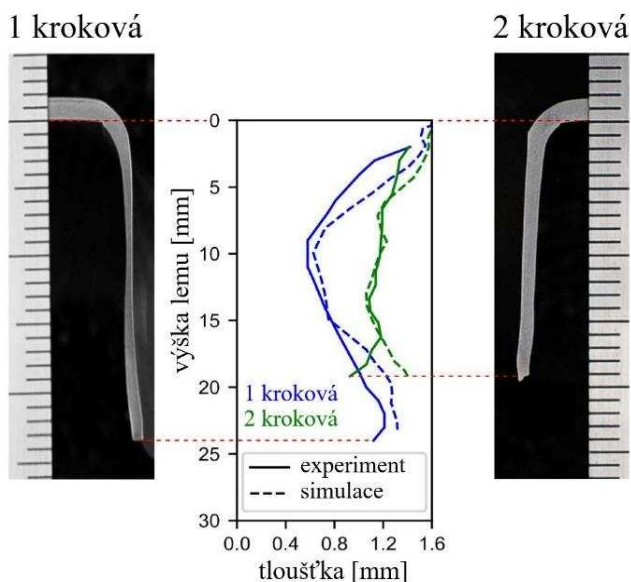
materiálu, který se v tom okamžiku ještě nachází pod nástrojem a brání se přesunutí do stěny lemu. Takové situaci se snaží vyhnout prvním přípravným stupněm. Nástroj se nejprve zanoří, jako by celý lem byl vytvořen na jeden krok, ale po zanoření středu kulové části trnu o poloměr sféry R_t odskočí směrem ke středu lemu opět o hodnotu poloměru sféry a teprve potom sjede až dolů. Díky menšímu radiálnímu zatížení nedochází k tak výraznému ztenčení ve střední oblasti lemu, ale zároveň je materiál kolem hrany matrice dostatečně využit a přetvořen. Ve druhém kroku dochází k dokončení šroubovým pohybem, kdy nástroj svým tvarem opisuje

válec o požadovaném rozměru vnitřního průměru lemu. Touto technikou je možné dojít k výrazně lepšímu rozložení tloušťky po výšce lemu, a tím dosáhnout lepší stability jak samotného lemu, tak shody experimentů s MKP výpočty. Naproti tomu výška lemu se nepatrně snížila. Porovnání výsledného tvaru pro jedno a dvou krokovou strategii včetně výsledků simulace ukazuje obrázek 34. K ilustrování výrazně vyšších dosažitelných deformací vůči lemování klasickým způsobem může dobře posloužit obrázek 35, kde jsou do výše zmíněného grafu (obr. 22) zaneseny body získané metodou SPIF. Graf je platný pouze pro dobře tvářitelné oceli s nízkou mezí kluzu. Nízkolegované a vysokopevnostní oceli dosud nebyly předmětem hlubšího zkoumání.

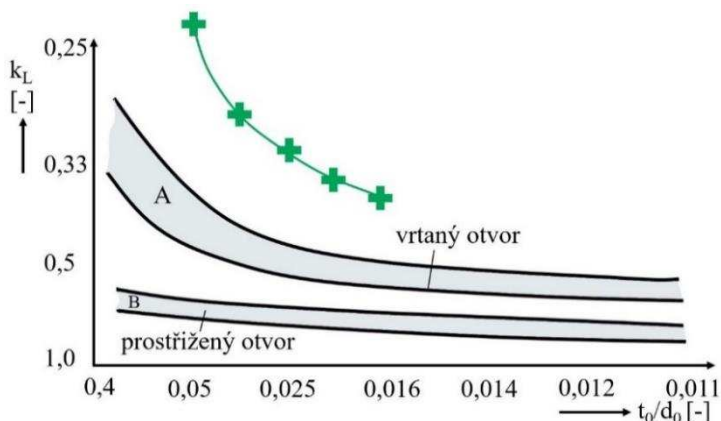
Snížení výrobního času se věnovaly i další studie. Výsledkem jedné z nich je návrh a konstrukce speciálních nástrojů, které se upínají do vřeten CNC frézek. Zmíněné vysokorychlostní nástroje jsou vidět na obrázku 36. Jejich výhodou je možnost nastavení vyosení tvářecích trnů na požadovanou hodnotu průměru a lem zhotovit pouze vertikálním pohybem, čímž se dá významně uspořit čas oproti případům, kdy rotační pohyb vykonává pracovní stůl. Rotační pohyb kolem osy trnu za účelem snížení tření může být nahrazen použitím valivého elementu. Nevýhodou této metody jsou geometrické a mírná kuželovitost lemu. Oba defekty se ale dají částečně eliminovat užitím horního přidržovače, respektive umístěním dvojice trnů naproti sobě. Tím se zároveň zlepši vyvážení vřetena.

3.1.7 Další způsoby výroby válcových lemů [33], [34], [35]

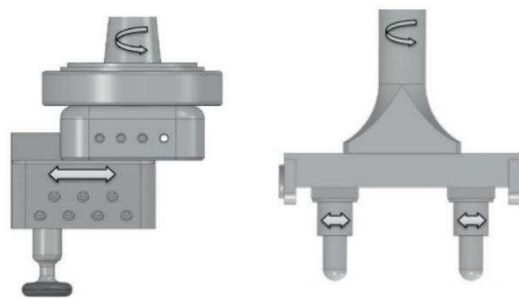
K vytvoření válcového lemu lze využít i alternativní způsoby výroby. Při klasickém způsobu se v polotovaru nejdříve vytvoří kruhový otvor, který je rozšiřován. Kolem díry se vytvářejí tahová napětí v obvodovém směru a při dosažení kritické hodnoty přetvoření podporují rozevírání trhlin vzniklých na povrchu díry. U následujících tří technologií bylo k problému přistupováno odlišně.



Obr. 34 Porovnání výsledků jednokrokové a dvoukrokové strategie [31]



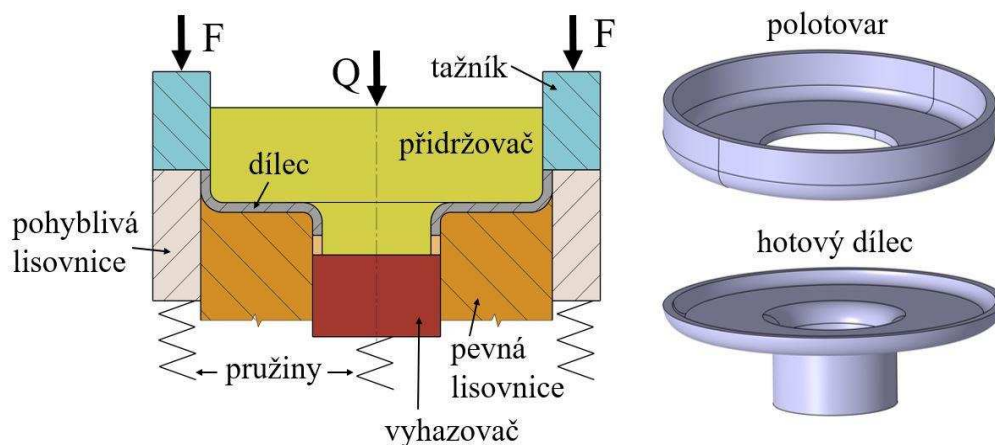
Obr. 35 Deformace dosažitelné metodou SPIF [32]



Obr. 36 Rychloběžné nástroje pro SPIF [32]

- **Lemování vytlačováním**

Pomocí technologie vytlačování je možné dosáhnout vysokých lemů bez výskytu trhlin, a navíc bez ztenčení stěny. Princip metody je znázorněn na obrázku 37. Nejprve se vyrobí kalíšek mělkým tažením a do jeho dna se prostřihne otvor. V další operaci je sevřen mezi

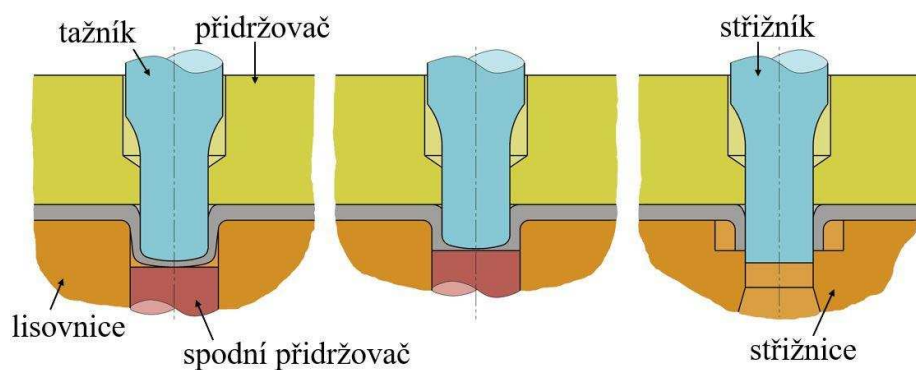


Obr. 37 Schéma metody lemování vytlačováním [32]

přidržovač a pevnou lisovnici. Přidržovač má na svém čele tvarový výstupek, který usměrňuje tok materiálu. Po sevření přidržovačem sjíždí dolů dutý tažník a tlakem na válcovou stěnu přesouvá materiál do dna kalíšku a ze dna kalíšku do lemu. Aby bylo možné dosáhnout dobrého výsledku, musí být vyvinuta dostatečně velká přidržovací síla. Jinak totiž hrozí ztráta vzpěrné stability ve dně kalíšku tím, jak se plech opře o výstupek na čele přidržovače. Vznikne velké zvlnění a k přesunu materiálu do lemu vůbec nedojde. Čím větší je rádius na čele přidržovače, tím snadněji se materiál přesouvá do lemu a není zapotřebí tak vysokých tvářecích sil. Z principu metody vyplývá potřeba použití dvojčinného lisu. Díky tlakovým napětím nedochází ke ztenčení plechu v oblasti lemu, tloušťka se naopak zvyšuje ve dně výtažku. Metoda je použitelná pouze pro materiály s dobrou tváritelností a převážně pro rotačně symetrické součástky.

- **Lemy vytvořené z průtaže**

I v tomto případě se jedná o více operační metodu. V první fázi se tažník s tvarovým čelem zanoří do rovného plechu a vytvoří tzv. průtaž. Ve druhé fázi je dno průtaže odstraněno prostřihnutím. Schematicky je postup znázorněn na obrázku 38. Díky spodnímu přidržovači je při pohybu tažníku dolů vytlačován materiál z čela tažníku do

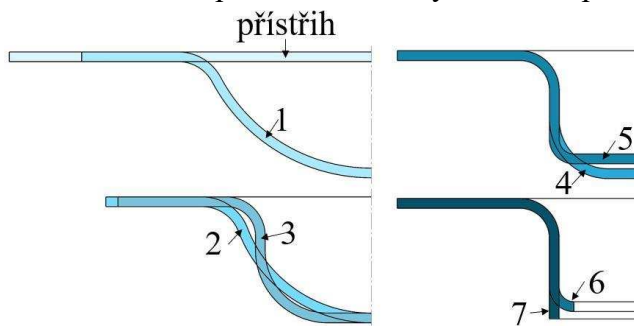


Obr. 38 Výroba lemů z průtaží [33]

stěny, čímž se zvyšuje výška finálního lemu. Přidržovač plní svoji úlohu i při překonání dolní úvratě beranu, kdy dále pěchuje materiál a na úkor výšky průtaže se zvětšuje její tloušťka. Sílu přidržovače je optimální nastavit tak, aby dno průtaže před prostřihnutím mělo tloušťku v řádech jednotek desetin milimetru. Tato metoda se používá jako přípravná operace pro vytvoření opěrné plochy před tvářením závitů především ve tlustých pleších, jelikož je materiál pro lem vtahován na úkor tloušťky základního plechu.

- **Lemování s využitím několikanásobného tažení**

Jde o poměrně komplikovaný proces, který je náročný na počet operací. Vyžaduje složitější nástroj a už se tak docela nejedná o lemování v pravém slova smyslu. Pro úspěšný výsledek je zásadní první tažná operace, ve které se tzv. rezervuje materiál pro operace následné. Musí být navržena tak, aby díky ní byl rezervován co největší objem materiálu. Mělo by v ní docházet k největšímu přetvoření, v navazujících operacích už by ke skokovému nárůstu přetvoření docházet nemělo. Při první operaci hraje důležitou roli fakt, jestli přístřih pro výtažek má volnou hranu nebo ne. Pokud ji volnou má, materiál se může mnohem snadněji dostávat z příruby do výtažku, téměř nedochází ke ztenčení stěny a celý proces je jednodušší, podobný hlubokému tažení. U rozměrnějších součástí, kde okolní materiál brání vtažení, se v první operaci materiál výrazně deformuje a není už v něm příliš velká zásoba plasticity pro další operace. V takových případech je postup složitější a je zapotřebí zvolit větší počet operací, nicméně se také dá dojít k uspokojivým výsledkům.



Obr. 39 Postup při výrobě lemu tažením [34]



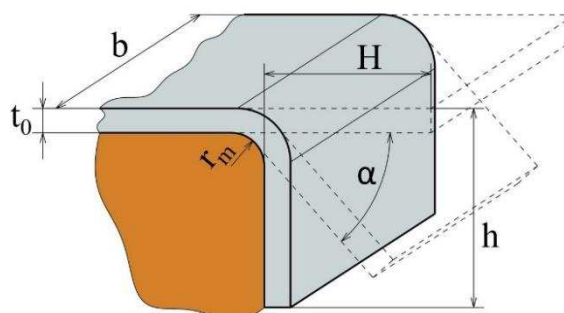
Obr. 40 Příklad výroby [35]

Postup, jak dosáhnout vysokých lemů bez výrazného ztenčení znázorňuje obrázek 37. Od druhé operace se zužuje průměr výtažku a zmenšuje poloměr zaoblení tažníku. Objem materiálu rezervovaném ve výtažku se už příliš nemění, ale výrazně se mění jeho tvar. V páté operaci už nedochází k zúžení. Zmenšení radiusu je kompenzováno posunutím dna. Následně se do dna prostřihne otvor a v poslední operaci se zkalibruje průměr lemu a narovná se přechodová oblast dna do stěny. Při potřebě extrémně vysokých lemů může být celkový počet operací i vyšší než dvacet. Snadněji se vyrábí lemy z kruhového přístřihu, ale ve většině případů jsou nekruhových a nesymetrických tvarů. Znovu platí, že materiály s dobrou plasticitou jsou méně náchylné k defektům, avšak dobrých výsledků lze dosahovat i s materiály s mezí kluzu kolem 500 MPa. Příklad výrobku zhotoveného uvedenou technologií ukazuje obrázek 40.

3.2 Ostatní lemy [17], [25], [35]

- **Přímé lemy**

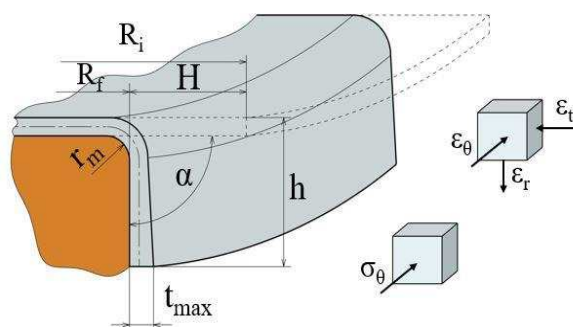
Tvorba přímých lemů je de facto ohýbání. Geometrické parametry takového lemu jsou na obrázku 41. Vnější ohybová síla musí překonat deformační odpor materiálu a způsobit požadovanou změnu tvaru. Finální tvar je ovlivněn odpružením, které se většinou pohybuje v rozmezí 1,5° až 3°. Odpružení se dá kompenzovat vybráním ohybnice, ale pak je nutné použít nepevný nástroj nebo klíny převádějící svislý pohyb beranu lisu na pohyb vodorovný a díky nim dojde k přitlačení plechu na ohybnici.



Obr. 41 Geometrie přímého lemu [25]

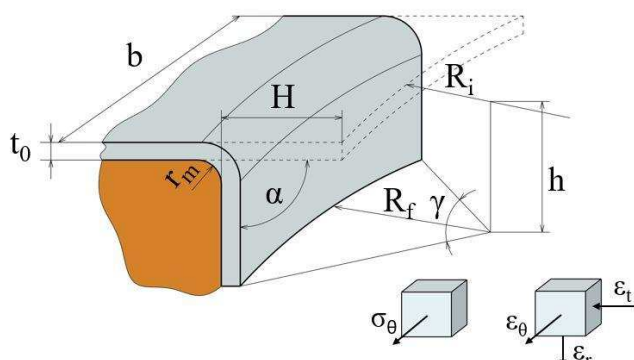
- **Vypuklé lemy**

Při tvarování se v lemovaném okraji tvoří tlaková tangenciální napětí, která přechují materiál a dochází k nárůstu tloušťky plechu. Geometrie vypuklého lemu je znázorněna na obrázku 42. Za určitých okolností v důsledku tlakové napjatosti hrozí ztráta stability lemu a vznik zvlnění. Tomu se někdy předchází vybráním lisovníku v určitých úsecích po jeho obvodu, do něhož se vtačuje přebytečný materiál.



Obr. 42 Geometrie vypuklého lemu [25]

- **Vydaté lemy**



Obr. 43 Geometrie vydatého lemu [25]

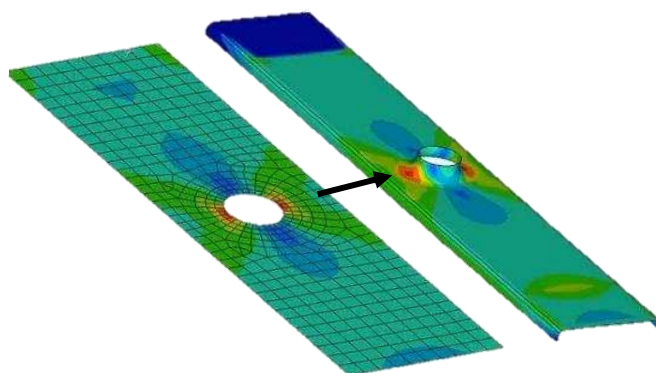
Při jejich tvorbě se materiál na hraně natahuje z původního poloměru R_i na hodnotu R_f . Vznikají tahová napětí v obvodovém směru, která mohou při kritické hodnotě ztenčení způsobit vznik trhliny. Významný vliv má kvalita povrchu hrany polotovaru. Maximální hodnoty přetvoření dosahují podobných hodnot jako při lemování otvorů, protože zde vzniká podobný stav napjatosti. Geometrie vydatého lemu je na obrázku 43.

3.3 Defekty lemů [29], [36], [37], [38]

Při vyhodnocování poruch je nutné brát v potaz provozní stav lemovaných dílců. To, co někde může být považováno za defekt, v jiných aplikacích nemusí způsobovat vůbec žádné potíže. Jako příklad lze uvést případ z obrázku 44. Lem je na součásti proveden za účelem odstranění volné střížné hrany, která je ovlivněna zpevněním a mikrotrhlinami, z místa největšího namáhání.

Odstraněním koncentrátoru napětí zaručí vyšší únosnost nebo delší životnost dílu.

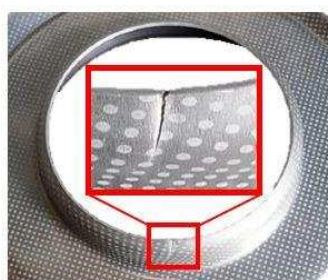
Ztenčení v blízkosti hrany otvoru tady nemusí být nutně na závadu.



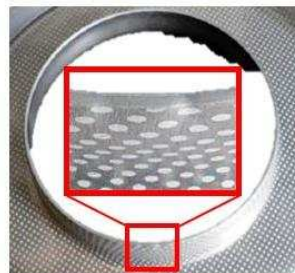
Obr. 44 Využití lemování za účelem zvýšení únosnosti nebo životnosti dílu [36]

Při lemování otvorů je v drtivé většině případů, a zvláště pak u středně a vysoko pevnostních materiálů, bráno jako kritérium dobrého nebo špatného výsledku přítomnost trhliny. Stejně kritérium je uplatňováno u vydatých lemů. Při lemování hlubokotažných ocelí, hliníku nebo při jednobodovém inkrementálním tváření se jako kritérium selhání mohou považovat i lemy s přílišným ztenčením stěny, které už nezaručí požadovanou tuhost. Z výroby jsou většinou vyřazovány i lemy s výskytem lokálního krčku. U vypuklých lemů je nejčastějším problémem ztráta stability a zvlnění. U všech druhů lemů může vzniknout trhlina na vnějším povrchu nejmenšího zaoblení hrany a jako defekt může být považováno i odpružení nebo

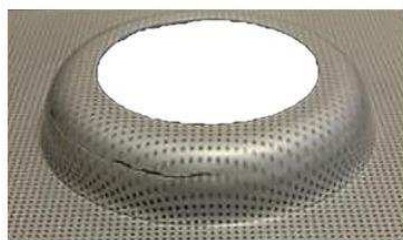
nedolisování, tedy odchylka od požadovaného tvaru. Příklady typických defektů vzniklých při lemování jsou zobrazeny na obrázku 45.



a) trhlina válcového lemu



b) lokální krček u válcového lemu



c) trhlina při lemování metodou SPIF



d) trhlina vydutého lemu

Obr. 45 Příklady defektů lemů [29], [37], [38]

4 TVÁŘITELNOST V TECHNOLOGII PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ [17], [39], [40], [41], [42]

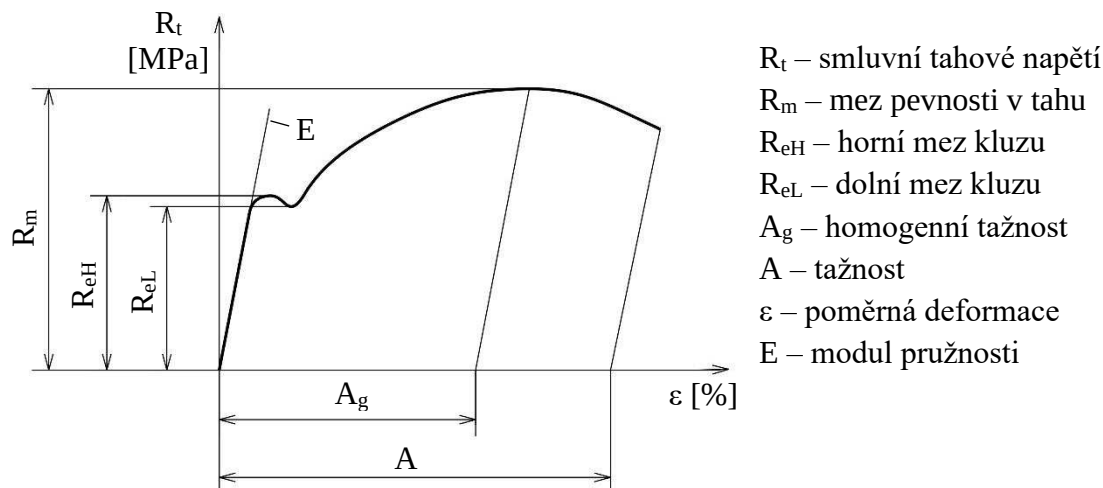
Jedním ze základních předpokladů úspěchu při výrobě součástí technologií plošného tváření je použití materiálu s odpovídající plasticitou. Plasticita je vlastnost materiálu, která je kvantifikována hodnotou plastického přetvoření před ztrátou plastické stability za daných termomechanických podmínek (teplota, napjatost, rychlost přetvoření). Naproti tomu tvářitelnost je schopnost materiálu trvale změnit tvar bez porušení – bez vzniku tvárného lomu. Je posuzována v celém rozsahu deformačního děje a vyhodnocuje se jak podle základních zkoušek, tak podle zkoušek speciálních, u nichž je cílem vyvolat vznik trhliny. Aby bylo možné zhodnotit vhodnost výběru materiálu pro tváření, zavádí se tzv. ukazatelé a charakteristiky plasticity. Pro plošné tváření jsou nejvýznamnější tyto charakteristiky:

- mez kluzu – důležitá hodnota napětí, při které kov přechází z elastického do plastického stavu
- poměr meze kluzu k mezi pevnosti – velmi dobrých plastických vlastností je dosahováno u materiálů s hodnotou menší než 0,65,
- homogenní tažnost – čím vyšší hodnota, tím lepší plasticita,
- exponent deformačního zpevnění – hodnoty 0,215 až 0,25 zaručují dobrou plasticitu,
- koeficient normálové anizotropie – hodnoty 1,25 až 1,6 vykazují dobrou plasticitu,
- koeficient plošné anizotropie,
- kritérium náchylnosti ke stárnutí – zvláště důležité pro hlubokotažné oceli.

Někdy se používá tzv. komplexní ukazatel tvářitelnosti, jenž je tvořen kombinací uvedených ukazatelů a nachází uplatnění v konkrétních aplikacích, pro které byl vytvořen. Hlavní roli při určování základních mechanických vlastností vzorku hraje tahová zkouška, jejíž provedení je dáno normou ČSN EN ISO 6892-1 (smluvní diagram viz obr. 46), z níž se dají stanovit všechny výše uvedené charakteristiky. Pokud není možné provést tahovou zkoušku, některé vlastnosti

se dají odhadnout pomocí zkoušek tvrdosti, nejčastěji podle Vickerse, kdy se uplatňuje přepočítání tvrdosti na mez pevnosti.

Ze základních zkoušek nelze zcela odhadnout chování materiálu při dané výrobní technologii, proto se v literatuře zavádí pojem technologická tvářitelnost, která zohledňuje kromě vlivu tvářeného kovu i např. geometrii nástrojů, třecí podmínky, způsob zatěžování atd. Pro konkrétní technologii je možné použít vztažné názvy jako lisovatelnost, kovatelnost, stříhatelnost apod. Technologická tvářitelnost se vyhodnocuje podle napodobujících zkoušek, které se snaží přiblížit podmínkám vybrané technologie. Mezi napodobující zkoušky

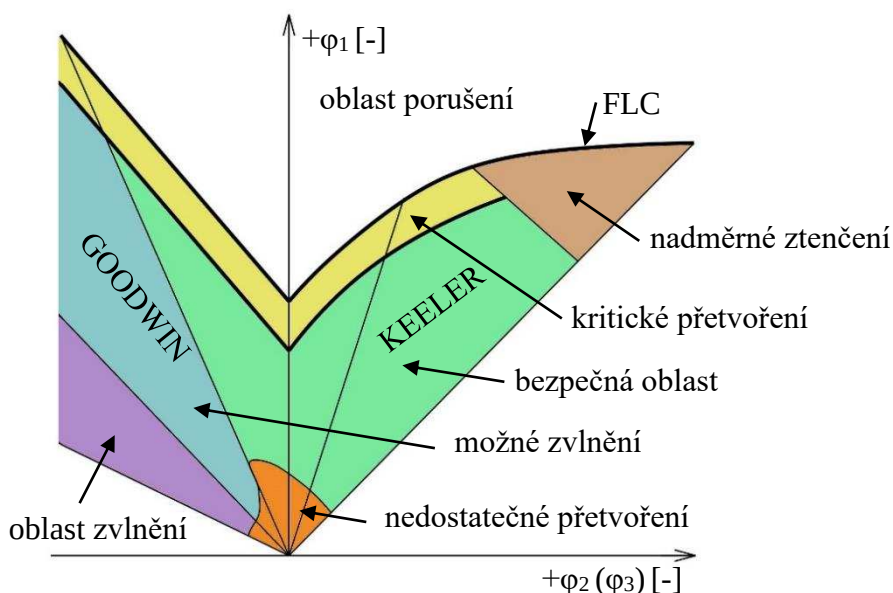


Obr. 46 Smluvní diagram tahové zkoušky [42]

tvářitelnosti použitelné pro plošné tváření lze zařadit např. zkoušku hloubením dle Erichsen, kalíškovací zkoušku, zkoušku rozšiřováním otvoru, Fukuiho zkoušku, hydraulickou zkoušku, zkoušku prostým ohybem, zkoušku lámavosti a celou řadu dalších.

4.1 Mezní tvářitelnost [18], [20], [39], [43]

Z výsledků technologických zkoušek lze zkonstruovat tzv. limitní diagramy tvářitelnosti (FLD), které jsou sestaveny z výsledků technologických a napodobujících zkoušek a používají se pro předpovídání vzniku defektu. Existuje jich velké množství a k posouzení mezní tvářitelnosti využívají různá kritéria. Nejznámější a nejvýznamnější pro plošné tváření je tzv. Keeler-Goodwinův (K-G) diagram, jenž je znázorněn na obrázku 47. Míru schopnosti



Obr. 47 Keeler-Goodwinův diagram mezní tvářitelnosti [43]

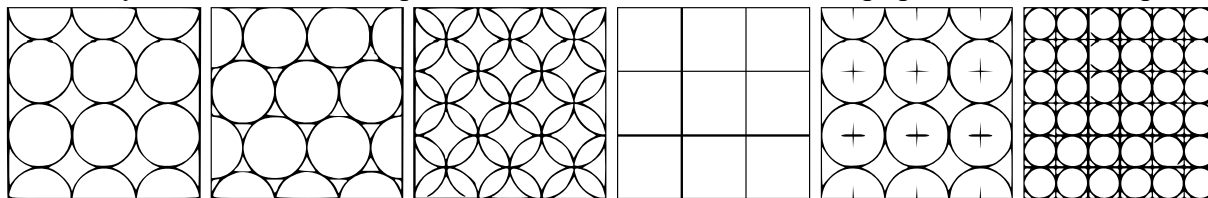
k přetvoření v něm popisuje křivka mezní tváritelnosti neboli FLC (forming limit curve). Odděluje oblast přípustných přetvoření od oblasti porušení. Těsně pod křivkou mezní tváritelnosti se nachází pásmo kritických přetvoření. Šířka pásma je odvozena z odsazení křivky o procentuální podíl hlavní deformace, většinou o 10 %, směrem dolů (žlutě podbarvená oblast v obr. 47). FLC je aproximační křivka proložená body vykazující určitý rozptyl, proto se doporučuje, aby se žádný element tvářené součásti nenacházel v pásmu kritických hodnot. Hlavní logaritmické přetvoření φ_1 (nebo poměrné přetvoření ε_1) se vynáší na svislou osu a na vodorovnou osu se vynáší vedlejší logaritmické přetvoření φ_2 (ε_2) nebo φ_3 (ε_3), které je kolmé na hlavní přetvoření. K-G diagram se sestavuje za předpokladů, že platí zákon o konstantním objemu $\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$ a současně $\varphi_1 > \varphi_2 > \varphi_3$. φ_3 je zpravidla přetvoření ve směru tloušťky plechu. Oblastí tah-tah se zabýval Keeler a nezávisle na něm se Goodwin zabýval oblastí tah-tlak. Polohy křivek zjišťovali analýzou deformační sítě série vzorků po provedení experimentů s různými kombinacemi hodnot hlavní a vedlejší deformace. Polohu křivky je též možné určovat pomocí výpočtových modelů nebo počítačovými simulacemi, ale jde spíše o odhady kritéria porušení a experimentálně-analytická cesta má pořád dominantní zastoupení, protože je z hlediska výsledků nejspolehlivější.

Vzhledem k FLC podle Keelera a Goodwina se ve velké míře posuzují výsledky numerických simulací při návrzích technologického postupu výroby součástek z plechu. Prostor pod křivkou lze rozdělit na několik charakteristických oblastí, které už v návrhové fázi mohou napovědět o charakteru výskytu defektu v bodě definovaném konkrétními hodnotami φ_1 a φ_2 . Stejně tak může dobře posloužit i při analýze poruch na hotových dílcích s nanesenou deformační sítí. Oblasti předpovídající charakter možného defektu jsou znázorněny na obrázku 47.

Poloha křivky v diagramu závisí na mnoha faktorech. Nejdůležitější je druh materiálu, významně však polohu ovlivňuje ještě exponent deformačního zpevnění, tloušťka plechu a teplota. S vyššími hodnotami uvedených významných faktorů se křivka posouvá na ose hlavních přetvoření nahoru.

4.2 Experimentální stanovení FLC [18], [20], [29], [39], [43], [44], [45], [46]

K definování FLC je zapotřebí získat data pro celý rozsah FLD, to znamená od poměrů hlavních a vedlejších přetvoření vznikajících při jednoosé tahové zkoušce až po poměry při biaxiálním vypínání. Mezní hodnoty přetvoření se zjišťují z deformovaných prvků deformační sítě nanesených při přípravě vzorků na povrch plechu, který není v kontaktu s deformujícím nástrojem. Nanesení sítě se dá provést několika způsoby – sítotiskem, elektrochemickým nebo fotochemickým leptáním, laserem, orýsováním apod. Příklady tvarů deformačních sítí jsou zobrazeny na obrázku 48. Při plošném tváření dochází ke dvěma případům deformace prvků



Obr. 48 Příklady deformační sítě [39]

sítě znázorněných na obrázku 49. Elementy sítě se z kruhů transformují na elipsy a z jejich rozměrů před a po provedení zkoušky se dají určit hlavní (φ_1) a vedlejší (φ_2) logaritmická přetvoření podle následujících vzorců:

$$\varphi_1 = \ln \frac{l_1}{d_k} \quad [-], \quad (4.1)$$

kde: l_1 – rozměr hlavní osy elipsy [mm]

d_k – průměr prvku před deformací [mm],

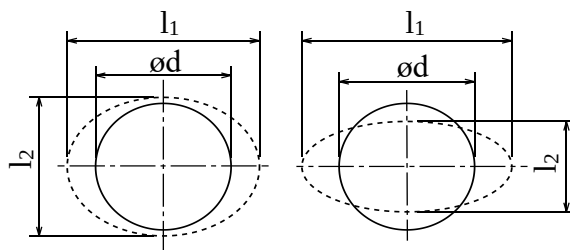
$$\varphi_2 = \ln \frac{l_2}{d_k} \quad [-], \quad (4.2)$$

kde: l_2 – rozměr vedlejší osy elipsy [mm].

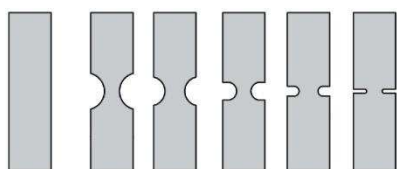
Zbývající přetvoření ve směru tloušťky (φ_3) se vypočítá ze zákona zachování objemu:

$$\varphi_3 = -\varphi_1 - \varphi_2 \quad [-]. \quad (4.2)$$

Každý bod FLC reprezentuje poměr deformací při okamžiku vzniku lokálního krčku, který těsně předchází výskytu trhliny. Deformační síť se vyhodnocuje až po vzniku první trhliny procházející celou tloušťkou plechu, ale oblasti ovlivněné lokálním zúžením nebo porušením se z výsledků odstraňují.



Obr. 49 Deformační síť [39]

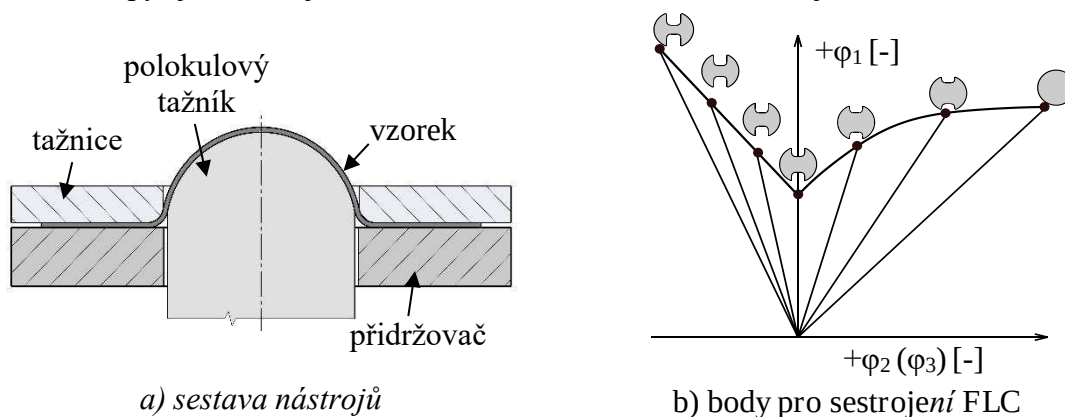


Obr. 50 Upravené vzorky pro tahovou zkoušku [39]

K potřebným stavům deformace se dochází buď vhodnou kombinací druhů zkoušek nebo vhodným výběrem geometrie vzorků při jediné zkoušce. Body křivky v Keelerově části diagramu se dají zjistit například hydraulickým vyboulováním nebo biaxiálním vypínáním sférickým tažníkem, body v Goodwinově části lze získat například z tahové zkoušky s upravenými vzorky viz obrázek 50. V normě ČSN EN ISO 12004-2, popisující postup při experimentálním zjišťování FLC, jsou použity metody podle Marciniaka a Nakajimy. Obě metody dokážou popsat křivku mezních přetvoření v celém rozsahu hodnot, a to použitím geometricky upravených vzorků, v případě zkoušky dle

Marciniaka se může upravit i rozměr a tvar tažníku.

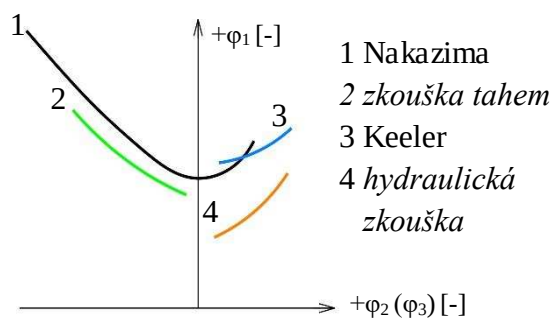
Zkouška dle Nakajimy je v praxi používána nejčastěji. Její princip je znázorněn na obrázku 51a. Sestava nástrojů je při celém průběhu zkoušení stejná a sestává z matrice, přidržovače a hemisférického tažníku. Mění se pouze tvar vzorků, a díky tomu vznikají různé deformační stopy, jak ukazuje obrázek 51b. Mezi vzorek a tažník je nanášeno mazivo, aby



Obr. 51 Zkouška dle Nakajimy [45]

k prvnímu porušení došlo co nejbližší vrcholu polokoule. V případě, že u biaxiálního vypínání není možné docílit trhliny v požadovaném místě, můžou se výsledky doplnit o body z hydraulické zkoušky. Podle Gorjiho [44] je tímto způsobem získaná křivka mezních deformací poněkud podhodnocena a v praktických aplikacích dochází ke vzniku lokálního krčku až při vyšších deformacích. K určitému rozptylu výsledků dochází i v porovnání mezi jednotlivými metodami získávání FLC, jak je vidět na obrázku 52.

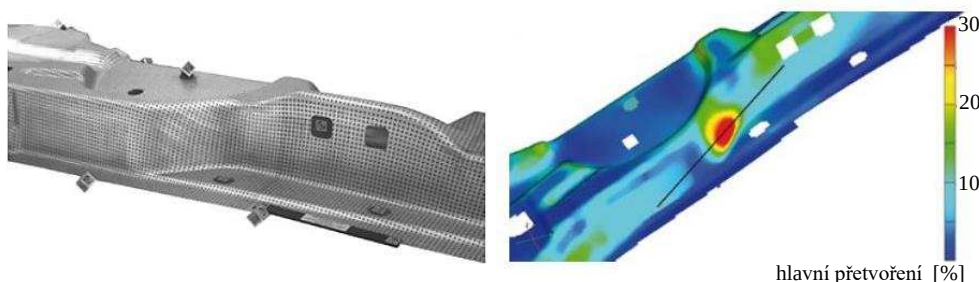
Po provedení zkoušky se vyhodnocuje přetvořená deformační síť. Je možné ji zkoumat například pod mikroskopem či profilprojektorem. Též se dají použít průhledné měřicí pásy, které dobře kopírují i zakřivené tvary, nicméně přesnost není příliš vysoká, a proto se v současnosti stále více používají optické měřicí systémy. Výhradní zastoupení na trhu mají produkty od německé společnosti GOM a sice ARGUS a ARAMIS.



Obr. 52 Porovnání různých metod pro získání FLC [44]

• ARGUS

Tento systém je určen především pro měření a analýzu deformací na plechových součástkách po procesu tváření. Před tvářecí operací se elektrochemicky nebo laserem nanese na povrch plechu deformační síť – kruhy s malým poloměrem v mřížkovém uspořádání a malými rozestupy. Středy kruhů jsou zpracovávány jako přesně definované body s přesnou vzdáleností od sebe před formováním součásti. Po ukončení procesu tváření se dílec umístí na plochu ohraničenou speciálními orientačními značkami, a z různých pozic se nasnímká digitálním fotoaparátem s vysokým rozlišením. Výhodou je, že mohou být nasnímány jak malé, tak i velké dílce v rádech až několika metrů. Sada fotografií je následně vyhodnocena v k tomu uzpůsobeném softwaru pomocí metody fotogrammetrie. Jednotlivé snímky jsou k sobě pospojovány díky orientačním značkám a softwarové algoritmy dokážou vypočítat přesnou polohu bodů v prostoru. ARGUS tak umožňuje vyhodnotit přetvoření v jednotlivých bodech, porovnat skutečný stav s numerickou simulací nebo porovnat reálný tvar výlisku s CAD modelem. Nevýhodou je, že nedokáže vyhodnotit data v blízkosti okrajů nebo trhlin. Výsledkem jsou barevné mapy přetvoření (viz obr. 53) či odchylek od CAD dat nebo se získané hodnoty vkládají do FLD a vyhodnocují vůči FLC. Přínos systému je v poměrně velké rychlosti a přesnosti vyhodnocení tvářených dílců a díky němu je rychleji a levněji nastavován nebo optimalizován výrobní postup.



Obr. 53 Deformační síť a barevná mapa přetvoření B sloupku osobního vozu vytvořená pomocí systému ARGUS [47]

• ARAMIS

Jde o další typ bezkontaktního optického měřicího systému. Od běžných metod nanášení deformačních sítí se odlišuje použitím nepravidelného, náhodně vytvořeného vzoru. Na sledovaný povrch se nejprve nanese bílá barva a ní se pak nasprejuje černý stochastický vzor, viz obr. 54. Stopy jsou osvětlovány jedním nebo dvěma reflektory a snímány dvěma CCD kamerami s vysokým rozlišením, které jsou propojeny se softwarem GOM Correlate pracující na principu DIC (digital image correlation). Kamery



Obr. 55 GOM Aramis [47]

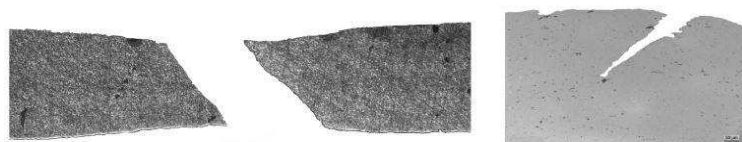
s reflektory jsou vidět na obrázku 55. Program dokáže náhodný vzor proložit velkým počtem malých plošek, každé z nich přiřadit určitý odstín šedi a podle něho každou plošku jedinečně identifikovat při průběhu deformace a vyhodnocovat tak jejich posunutí či deformace. Systém je schopen pracovat v reálném čase a dokáže zachytit i rychlé dynamické děje, kamery totiž mohou mít snímkovací frekvenci až 8000 Hz. Je stejně jako ARGUS vhodný pro měření malých i velkých součástí a také pro využití v laboratořích například při vytváření FLC, stejně jako je vhodný pro využití v praxi. Je schopen měřit i rychlosti a zrychlení snímáných bodů. Jeho výhodou je již zmíněné měření v reálném čase a vysoká dosažená přesnost. Výsledky měření mohou být opět prezentovány jako barevné mapy deformací nebo jako body v FLD diagramu. Nevýhodou ARAMISU je, že dokáže vyhodnocovat jen body, na které „vidí“ obě kamery. Omezující může být v některých případech snímkovací frekvence, protože těsně před vznikem porušení je rychlost deformace nejvyšší a nemusí tak být zachycen správný okamžik vzniku trhliny. Dalším omezením může být nedostatečné rozlišení kamer, pokud se například zkoumají deformace v těsné blízkosti praskliny. Systém totiž kvůli „hladším“ výsledkům a odstranění šumu, k výpočtu deformace v dané plošce bere v potaz i plošky okolní a ty mohou výsledky ovlivnit zásadním způsobem.

4.3 Limity použití limitní křivky K-G diagramu [36], [37], [38], [43], [44], [48]

K-G diagram je sice velice užitečným nástrojem pro zhodnocení výrobitelnosti. Velký význam má v numerických simulacích, ale není schopen zaručit spolehlivou předpověď selhání pro všechny technologie plošného tváření. FLC předpovídá vznik krčku, který obvykle předchází vzniku trhliny, a je založen na selhání membrány. To znamená, že po tloušťce plechu nevzniká výrazný deformační gradient a k selhání dojde skrz celou tloušťku. Diagram je vhodný a spolehlivý pro hluboké tažení do určitého stupně deformace, běžné lisování, hydroformování, vypínání apod. Naopak jako nevhodné kritérium výskytu porušení se jeví při operacích ohýbání a lemování, rozšiřování či lemování otvoru, jednobodové inkrementální tváření a spolehlivý není ani pro předpověď selhání v oblastech blízko hran plechu.

4.3.1 Ohýbání a tvorba přímých lemů [44], [48]

Při ohýbání se tvoří silný deformační gradient ve směru tloušťky plechu. Na vnější straně ohybu dochází k natahování materiálu, kdežto na vnitřní straně dochází k jeho stlačování. Při ohýbání širokých pásů nastává přibližně rovinný stav deformace a materiál se z natahované oblasti přesouvá do stlačované oblasti a plastická deformace je lokalizovaná do malého prostoru. K porušení nedochází v důsledku ztráty stability membrány (střednice), ale trhlina se iniciuje z místa nejvíce namáhaného tahem v blízkosti velkých intermetalických částic a má charakter interkrystalického lomu. Rozdíl mezi porušením vzniklým selháním membrány a porušením vzniklým na vnějším povrchu při ohybu je znázorněn na obrázku 56.

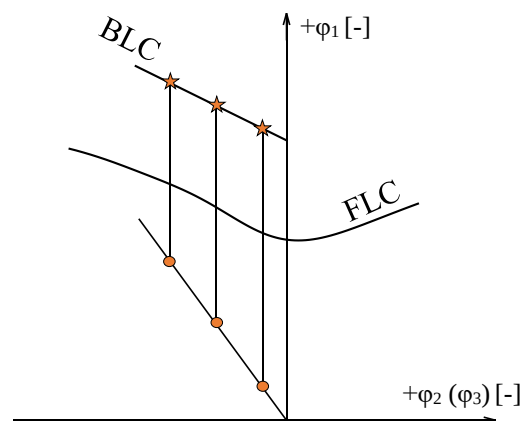


a) selhání membrány

b) trhlina při ohybu

Obr. 56 Rozdílná příčina vzniku trhliny [44]

V důsledku toho není FLC spolehlivým kritériem vzniku porušení pro ohýbání a lemování. Limitními deformacemi při ohýbání se zabývala celá řada vědeckých studií a výsledkem některých z nich je popis vzniku porušení tzv. BLC (bending

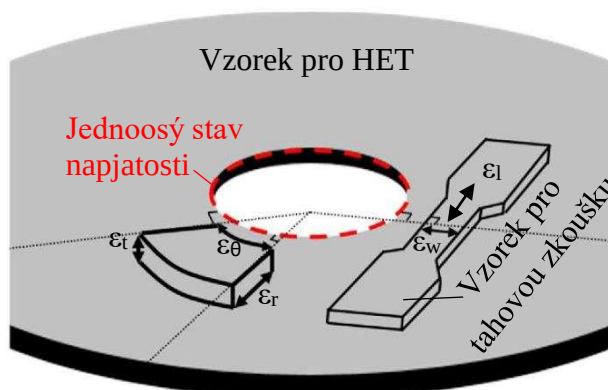


Obr. 57 Porovnání FLC a BLC [48]

limit curve). Porušení vzniká při vyšších hodnotách hlavního přetvoření než u technologií využívajících jako kritérium FLC, protože mezní hodnoty neurčuje vznik krčku, ale trhlina na vnější straně ohybu. Porovnání obou křivek je znázorněno na obrázku 57. Křivka BLC vznikne tak, že se ohýbaný vzorek nejdříve natáhne na určitý stupeň deformace a až poté je ohýbán tříbodovým ohybem, při kterém se sleduje počátek porušení. Deformace jsou zaneseny do diagramu mezních přetvoření a proložením experimentálně zjištěných bodů křivkou vznikne BLC. Její poloha v FLD závisí mimo jiné na poloměru ohybníku a tloušťce plechu. Čím menší poloměr zaoblení ohybník má, tím se BLC posouvá k vyšším hodnotám hlavní deformace.

4.3.2 Rozšiřování otvoru [49], [50], [51], [52], [53]

Jak už bylo zmíněno výše, při rozšiřování (lemování) otvoru v blízkosti volné hrany nastává jednoosý stav napjatosti, jako je tomu např. při tahové zkoušce. Materiál je v blízkosti otvoru namáhán pouze obvodovým napětím ϵ_θ a radiální napětí σ_r zůstává nulové. Přímou se pak nabízí myšlenka pro srovnání obou napěťových stavů z hlediska stavů deformačních. Obvodové přetvoření při rozšiřování je v korespondenci s hlavním osovým přetvořením ϵ_l u tahové zkoušky, radiální deformace v místě mimo okraj zase odpovídá deformaci ϵ_w ve směru šířky. Srovnání přetvoření je znázorněno na obrázku 58. Ačkoliv by se mohlo zdát, že na dosažitelné hodnoty deformací při rozšiřování otvoru lze snadno aplikovat výsledky tahové zkoušky, opak je pravdou. Rovněž platí, že hodnoty deformací vzniklé při rozšiřování otvoru nelze vyhodnocovat vůči klasické FLC, popisující vznik krčku. V současné době se pro zhodnocení z hlediska výrobitelnosti lemů nejčastěji používá mezní poměr rozšíření otvoru HER (hole expansion ratio), definovaný testem zvaným HET (hole expansion test) jako:



Obr. 58 Srovnání vzorků a deformací pro HET a tahovou zkoušku [51]

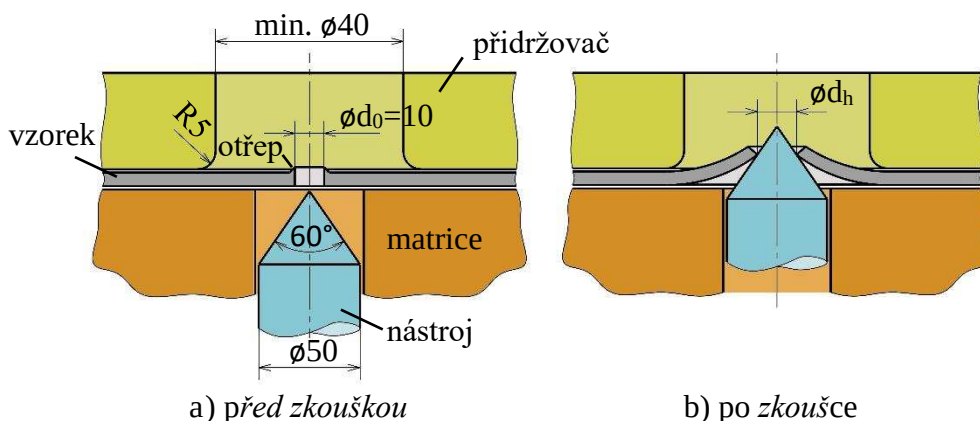
$$HER = \frac{d_h - d_0}{d_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4.1)$$

kde: d_h – průměr otvoru po vzniku porušení [mm]
 d_0 – počáteční průměr otvoru [mm].

Při porovnání hodnoty HER v okamžiku vzniku trhliny a tažnosti bylo zjištěno, že při roztahování díry připravené trískovým obráběním HER několikanásobně převyšuje hodnotu tažnosti. Výzkumníci se veskrze shodují na tom, že příčinou je silný gradient obvodové deformace ve směru od hrany otvoru k patě lemu. Při tahové zkoušce jsou volné dvě hrany, kdežto u lemování otvoru pouze jedna a obvodová deformace navíc není rovnoměrná ani po tloušťce plechu. Rovněž bylo zjištěno, že při rozšiřování otvoru je potlačen vznik difuzního krčku, kterému brání relativně málo zdeformovaná masa materiálu v malé vzdálenosti od hrany a až těsně před vznikem trhliny se u ocelí nižších a středních pevností vyskytuje lokalizovaný krček. Při sledování tahové zkoušky metodami DIC bylo zjištěno, že deformace ve směru šířky vzorku je při vzniku difuzního krčku přibližně srovnatelná s deformací tloušťky, ale při tvorbě lokalizovaného krčku už nárůst podélné deformace nastává pouze na úkor ztenčování plechu, což připomíná rovinný stav deformace. Neúspěšně dopadly i různé pokusy o vytvoření univerzální rovnice závislosti HER na některém parametru získaném při tahové zkoušce. Většina vztahů je použitelná pouze pro určitý typ materiálu. Největších shod pro obráběné otvory bylo dosaženo předpovědí hodnot HER v závislosti na velikosti příčné deformace ϵ_w před vznikem krčku při tahové zkoušce a pro prostřížené otvory nejlépe funguje závislost na

hodnotách nehomogenních plastických deformací po vzniku krčku. Dobrá shoda byla dosažena i v případě predikce pomocí poměrného zúžení. V poslední době se pro předpověď HER používá i vrubová houževnatost.

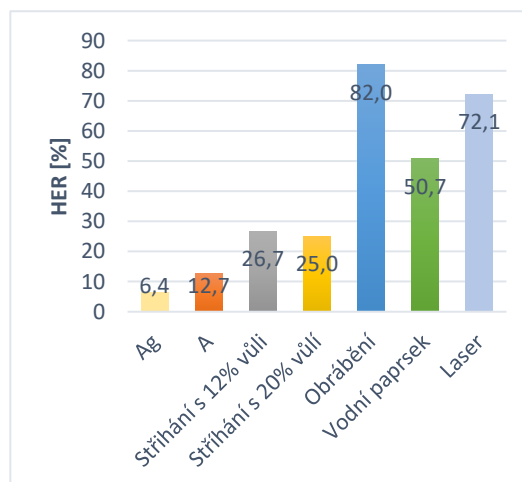
Poměr rozšíření otvoru je procentuálně vyjádřená převrácená hodnota koeficientu lemování k_L a významně závisí na stavu povrchu otvoru. V normě ČSN ISO 16630 je popsána metoda pro testování rozšiřování otvoru plechů v rozmezí tloušťek 1,2 až 8 mm kuželovým nástrojem, schéma metody viz. obrázek 59. V normě je přesně definováno, že otvor musí být zhotoven prostřížením s relativní vůlí 12 %, mít průměr 10 mm a zároveň by měl být umístěn minimálně 45 mm od volné hrany zkušební vzorku.



Obr. 59 Schéma zkušební metody rozšíření otvoru dle ČSN ISO 16630 [52]

Kuželový nástroj má vrcholový úhel 60° a průměr alespoň 50 mm a jeho minimální tvrdost je 55 HRC. Matrice musí mít vnitřní průměr alespoň 40 mm, ale s uvažováním předpokládaného konečného průměru otvoru může být průměr i větší. Pro poloměr zaoblení matrice se doporučuje hodnota 5 mm. Zkušební vzorek musí být pevně sevřen tak, aby při pohybu tažníku nedocházelo ke vtahování materiálu pod tažník z upnuté části a musí být orientován otřepem, vzniklý při stříhání, směrem od tažníku. Pohyb nástroje musí být zastaven neprodleně po výskytu trhliny procházející skrz celou tloušťku plechu.

V normě je uveden přesný postup přípravy díry, ale ten není ve velké části experimentálních studií dodržen z geometrických důvodů, kvůli zkoumání vlivu střížné vůle či dalších střížných parametrů na dosažitelný stupeň deformace nebo z důvodu porovnání technologií zhotovení otvoru, jak ilustruje obrázek 60. Navzdory snaze vyrobit z této metody univerzální zkoušku pro zjišťování a porovnání schopnosti různých materiálů vytvořit lem z prostřížené díry, výsledky jsou citlivé na opakovatelnost přípravy otvoru, jsou ovlivňovány subjektivním vyhodnocováním a nestanovenou pevnou geometrií matrice. Bylo zjištěno, že výsledky se liší laboratoř od laboratoře. U vysokopevnostních ocelí s nízkou schopností rozšiřovat otvor je navíc obtížné HER stanovit přesně, jelikož k němu dochází velmi brzo po spuštění testu a prodleva mezi vznikem trhliny a zastavením pohybu nástroje má velký vliv na vyhodnocení výsledků. Tomu je dnes částečně předcházeno speciálními zkušebními stroji, které jsou díky kamerám s vysokou snímkovací frekvencí a vyhodnocovacím softwarem schopny zastavit zkoušku neprodleně po výskytu trhliny. Pokud by došlo k podezřelé odchylce v měření, je možné obsluhou z videozáznamu výsledek zpřesnit. I přes své nedostatky je metoda známa a uznávána širokým spektrem vědeckých institucí a výrobců plechů. Někteří výrobci dokonce HER zahrnují do materiálových

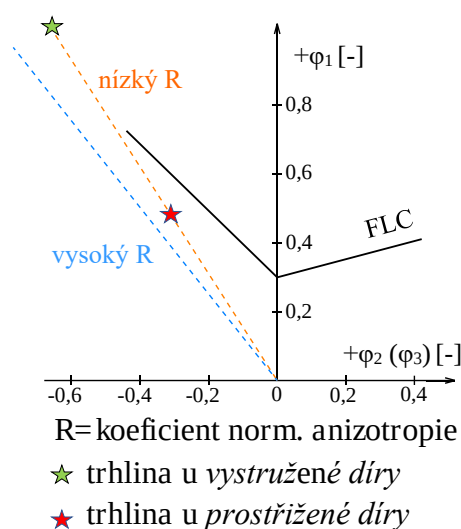


Obr. 60 Srovnání HER oceli DP 980 [53]

listů, protože lemování a lemování otvorů je dnes velké téma hlavně v automobilovém a leteckém průmyslu. Rozdílné dosažené hodnoty pro různé technologie zhotovení otvoru a nevhodnost použití FLC při rozšiřování otvoru oceli DP 600 názorně ukazuje obrázek 61. Na hodnoty rozšíření otvoru má významný vliv i mikrostruktura materiálu. Obecně lze říct, že čím je jemnozrnější, tím menší sklony k tvorbě trhliny má. Faktorem je podíl fází a rozdíl jejich mechanických vlastností. Bylo například dokázáno, že dvoufázové oceli při stejných hodnotách mezi pevnosti a kluzu jako komplexní oceli, vykazují mnohem menší schopnost rozšiřovat otvor bez výskytu trhlin. Důvodem je vysoký rozdíl tvrdosti mezi martenzitickou disperzí a feritickou maticí u dvoufázových ocelí. Komplexní oceli obsahují kromě martenzitu i bainit a zbytkový austenit a není u nich tak výrazný rozdíl tvrdosti mezi jednotlivými fázemi. Nízkých hodnot poměrů rozšíření otvoru je dosahováno s austenitickými vysokopevnostními oceli.

4.3.3 Blížkost hrany [49], [50], [51], [52], [53], [54], [55], [56], [57]

Limitní křivka v K-G FLD není vhodná ani pro předpověď porušení v blízkosti volné hrany při tváření plechů. Současná doba vyžaduje používání plechů standartních a pokročilých vysokopevnostních ocelí v konstrukcích automobilů. Kované a odlévané polotovary některých konstrukčních prvků mohou být díky plechům z vysokopevnostních ocelí s relativně dobrou tvářitelností nahrazovány výlisky a může tak dojít k zajímavé úspoře celkové hmotnosti vozidla při zachování nebo zlepšení bezpečnostních parametrů. Použití vysokopevnostních materiálů však do velké míry limituje jejich omezená tvářitelnost v blízkosti hran, které jsou v převážné většině zhotoveny stříháním. Stříhání zanechá do přístřihu určitou míru plastické deformace a mikrotrhlínky na střížném povrchu, čímž částečně vyčerpává zásobu plasticity a mikrotrhlínky jsou malými koncentratory napětí, které mohou iniciovat trhlínu. Největší problémy nastávají při tahovém napětí v blízkosti hran, což je typické třeba při lemování vydutých lemů nebo lemování otvorů.



Obr. 61 Porovnání HER a FLC [49]

K posouzení vhodnosti materiálu k natahování v blízkosti hrany může posloužit metoda rozšiřování otvoru. Vzniká při ní podobný stav napjatosti a deformace jako při lisování s tahovými napětími v blízkosti střížné hrany. V [54] je například popsána metoda, kdy je při HET a při tzv. Kobe testu (tahová zkouška s prostříženým kruhovým otvorem) zjištěna maximální hodnota hlavní deformace, při které ještě nedochází k žádným trhlinám a o tuto hodnotu je rozšířen klasický K-G diagram. Přijatelné hodnoty přetvoření nejsou omezeny pouze FLC, ale i vodorovnou úsečkou v hodnotě maximální hlavní deformace bez výskytu trhlin. Tento postup je vhodný pro numerické simulace, ale pro analýzu poruch na hotových dílcích už příliš praktický není. Je aplikovatelný především pro oblasti s lineární deformační stopou v oblasti tah-tlak. Aby bylo možné porovnat dosažitelné hlavní deformace rozdílných technologií, musí být zajištěn i shodný nebo co nejvíce podobný stav střížné hrany.

Další možností, jak využít HET k predikci vzniku porušení, je měření tloušťky plechu v blízkosti vzniku trhliny, ale zároveň dostatečně daleko, aby měření nebylo ovlivněno vzniklým lokalizovaným krčkem. Změřenou tloušťku je možné přepočítat na poměrné ztenčení a určit bezpečnou hodnotu, při které ještě nehrozí prasknutí. Tento postup je aplikovatelný a snadno posouditelný v numerických simulacích, ale hlavně užitečný i při analýzách porušení na reálných výliscích. Hodnoty maximálního ztenčení je možné dosáhnout i přepočtem přímo ze změřených hodnot HER za předpokladu zákona zachování objemu a jednoosé napjatosti podle následujících vztahů:

$$R = \frac{\varphi_w}{\varphi_t} \approx \frac{\varphi_r}{\varphi_t} \quad [-], \quad (4.2)$$

kde: R je koeficient normálové anizotropie plechů [-]

φ_w je logaritmické přetvoření ve směru šířky vzorku při tah. zkoušce [-]

φ_t je logaritmické přetvoření ve směru tloušťky plechu [-]

φ_r je logaritmické přetvoření v radiálním směru při lemování otvoru [-].

$$\varphi_\theta = -R \cdot \varphi_t - \varphi_t \quad [-], \quad (4.3)$$

kde: φ_θ je obvodové logaritmické přetvoření při lemování otvoru.

$$\varphi_\theta = \ln \left(1 + \frac{HER}{100} \right) \quad (4.4)$$

$$\varphi_t = - \frac{\ln \left(1 + \frac{HER}{100} \right)}{R + 1} \quad (4.5)$$

Nyní už lze vyjádřit poměrnou deformaci tloušťky plechu ε_t . Protože se plech ztenčuje, hodnota vychází záporná. Vynásobením deformace (-1) a dosazením nejmenší naměřené hodnoty HER a R můžeme získat hodnotu ztenčení, neboli ETL (edge thinning limit):

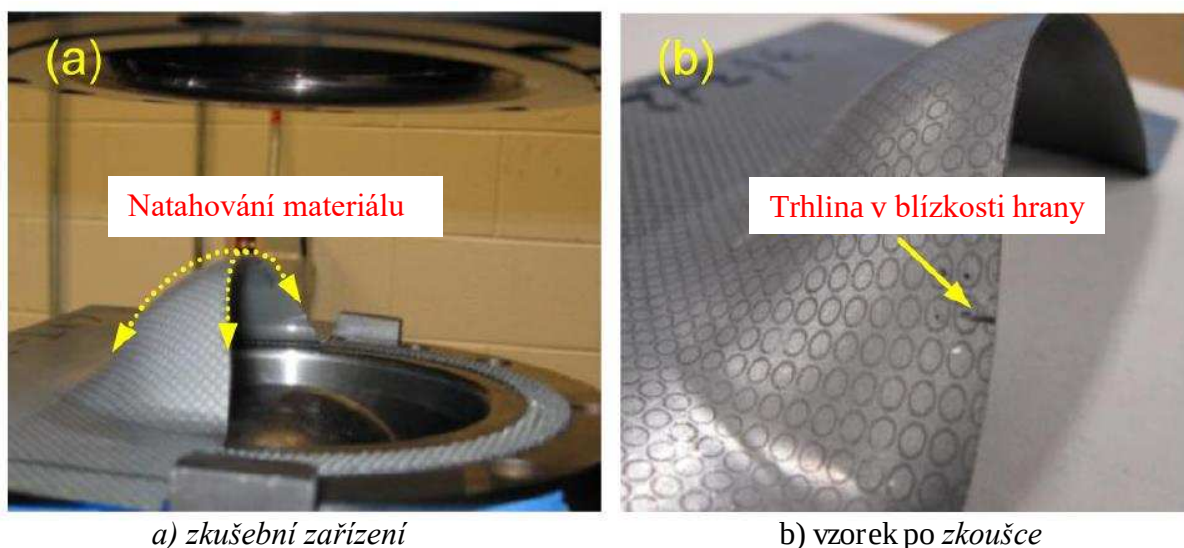
$$-\varepsilon_t = ETL = 100 \cdot \left(1 - \exp \left[\frac{\ln \left(1 + \frac{HER_{min}}{100} \right)}{R_{min} + 1} \right] \right) \quad [\%], \quad (4.6)$$

kde: HER_{min} je minimální hodnota získaná při testu rozšiřováním otvoru [-],

R_{min} je minimální hodnota koeficientu normálové anizotropie pro určitý směr odběru vzorku pro tahovou zkoušku vůči směru válcování plechu [-].

ETL se využívá z toho důvodu, že má výhodnější tvar jak pro ověřování výrobních možností numerickými simulacemi, tak pro vyhodnocení tloušťky plechu na reálných vzorcích než poměr rozšíření otvoru.

V automobilce Honda se pro vyhodnocování citlivosti materiálů k tvorbě trhlin při natahování v blízkosti stříhaných hran používá metoda HSDT (half specimen dome test). Princip metody je zřejmý z obrázku 62. Vzorky mají tvar obdélníku a jsou zhotovovány rovnoběžnými nebo vůči sobě skloněnými přímými noži. U nich je možné snadno nastavovat a měnit střížné parametry jako střížná vůle nebo úhel sklonu nože bez nutnosti výroby různých variant střížných nástrojů, což je nesporná výhoda oproti metodě HET. Příprava vzorků je



a) zkušební zařízení

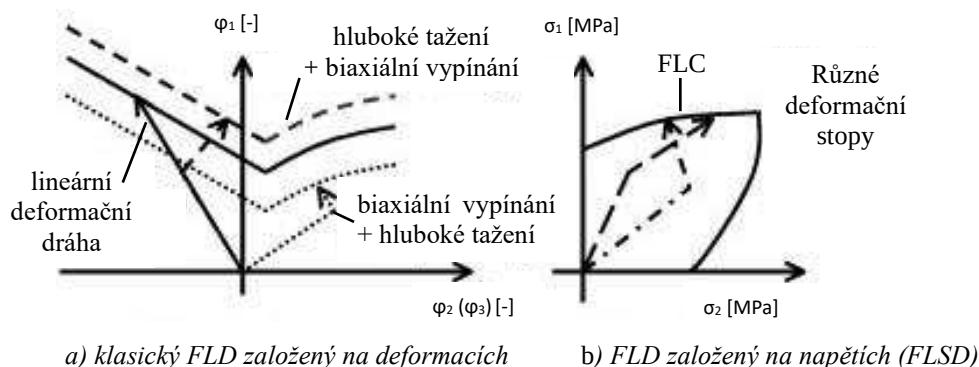
b) vzorek po zkoušce

Obr. 62 Metoda HSDT [57]

snadnější, rychlejší a levnější. Připravené vzorky jsou následně pevně upnuty do zkušebního zařízení podobného tomu pro Erichsenovu zkoušku. Vzorek se do stroje umístí tak, aby zkoumaná hrana byla ztotožněna s osou polokulového tažníku, ten vertikálním pohybem deformuje vzorek a největší tahová namáhání vznikají v blízkosti hrany. Trhlina se vždy vyskytuje v blízkosti kontaktu plechu s tažníkem. Touto metodou je dosahováno mnohem menšího rozptylu výsledků a další výhodou je možnost sledování a vyhodnocování testu optickým měřicím systémem.

4.3.4 Nelineární deformační dráhy a více operační výrobní postupy [58], [59]

Další limit konvenčního K-G FLD je v jeho aplikaci u tvářecích operací se silně nelineárními deformačními stopami v některých oblastech tvářeného plechu nebo u tvářecích postupů, kde jsou například v jedné operaci dvě složky hlavních přetvoření kladné a v následující operaci je jedna složka kladná a druhá záporná. Ve studiích bylo dokázáno, že porušení nastalo i v případech, kdy se všechny elementy výlisku nacházely pod FLC. Z tohoto důvodu se začaly používat limitní diagramy založené na složkách napětí – FLSD (forming limit stress diagram), viz obrázek 63. Tyto diagramy jsou výrazně méně závislé na deformační historii či deformační

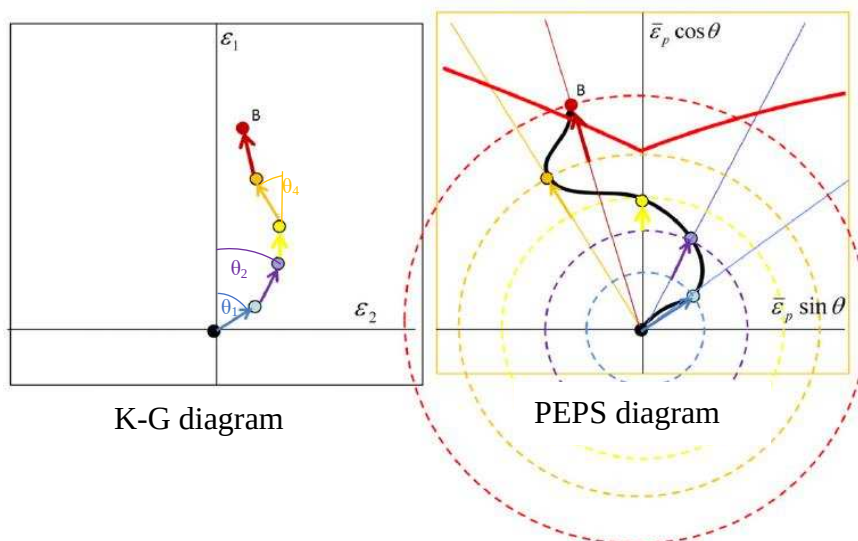


Obr. 63 FLD nezávislý na deformační historii [58]

stopě a jsou tak využitelné pro širší spektrum reálných tvářecích procesů. Největší uplatnění nachází při zhodnocení možností výroby s využitím numerické simulace. Naopak nepraktický je pro analýzu výlisků, jelikož měření jednotlivých složek napětí v každém elementu tvářené součástky je nemožné. Někdy není spolehlivý ani při zhodnocení numerických simulací, jelikož může docházet k bifurkaci řešení hlavně z důvodu kontaktního napětí mezi nástrojem a výliskem, kdy se jednotlivé uzly sítě při vzájemném pohybu oddělují a znovu spojují – při stejné nastaveném výpočtu je možné dojít k odlišným výsledkům. Problémy nastávají také při nevhodném tvaru aproximační křivky zpevnění. Když se začne narovnávat do vodorovného směru, může při malém nárůstu napětí dojít ke skokové změně přetvoření a nepříznivému ovlivnění výsledků výpočtu. V technické praxi se zatím příliš nepoužívá hlavně ze zmiňovaného důvodu nemožné kvantifikace napětí na reálných výliscích a oproti zažitým FLD dle Keelera-Goodwina není tak přehledný a intuitivní.

Nevýhody FLD a FLSD stírá tzv. PEPS FLD (polar effective plastic strain) který bere v potaz deformační historii a tvarem FLC se blíží zažitému K-G FLD. Pro technické pracovníky tak může být přijatelnější než FLSD. Rozdíl oproti klasickému FLD je ten, že se na osy diagramu vynáší efektivní přetvoření $\bar{\epsilon}_p$ vynásobené goniometrickou funkcí úhlu θ , jenž je dán poměrem přírůstku ϵ_1 a ϵ_2 v jednotlivých krocích tvářen, jak je znázorněno na obr. 64. Kružnice vyjadřují efektivní přetvoření a šipky vyjadřují přírůstek deformace. Nejprve se do grafu vynesou souřadnice odpovídající efektivnímu přetvoření po první fázi tvářen a další bod se zkonstruuje tak, že se z přírůstků přetvoření v klasickém diagramu určí úhel θ_1 , výchozí bod úsečky pro vynesení druhého bodu se přesune po kružnici představující konstantní hodnotu efektivního přetvoření tak, aby směr druhé vynášené úsečky vycházel z počátku souřadnic

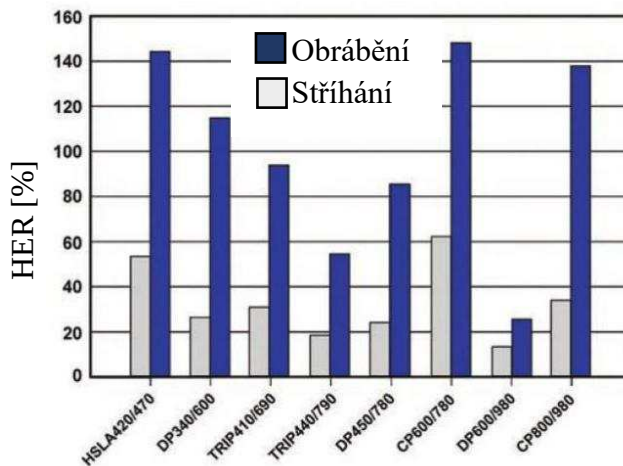
a úsečka svírala se svislou osou úhel θ_2 . Takto se postupuje i u všech následujících kroků a pokud je poslední bod nad FLC, jejíž tvar je upraven pro polární diagram, dochází ke vzniku krčku. Je důležité poznamenat, že výpočet úhlu θ nemá žádný fyzikální význam, slouží jen pro jednodušší interpretaci FLD s nelineárními deformační cestou. Tento diagram se ale zatím v technické praxi příliš nepoužívá i z toho důvodu, že není implementován do výpočtových programů.



Obr. 64 Konstrukce PEPS diagramu [59]

4.4 Možnosti zvýšení HER [60], [61], [62]

Pro případ, kdy je potřeba na reálné součásti dosáhnout vyššího lemu, a tedy zvýšit poměr rozšíření otvoru, se nabízí několik řešení. První variantou je změna materiálu. Jak je vidět na obrázku 65, například komplexní oceli mají vynikající schopnost rozšiřovat otvor. Pořizovací náklady komplexních ocelí jsou však vysoké, a navíc jejich vlastnosti nemusí vyhovovat z hlediska dalších požadavků na výrobní proces. Další možností je upravit technologii přípravy otvoru pro následné rozšiřování (lemování). Na obrázcích 60 a 65 jsou znázorněny rozdíly pro dosažitelné hodnoty HER jednotlivých technologií. Nejlépe ze srovnání vychází třískové obrábění, které je však pro potřeby plošného tváření početnějších sérií pomalé, neefektivní a nákladné. Poměrně dobrých hodnot je dosahováno i s otvory zhotovenými laserem. Tato technologie se používá například při přípravě polotovarů pro transferové lisování, ale je nemožné ji zakomponovat do postupového nástroje.

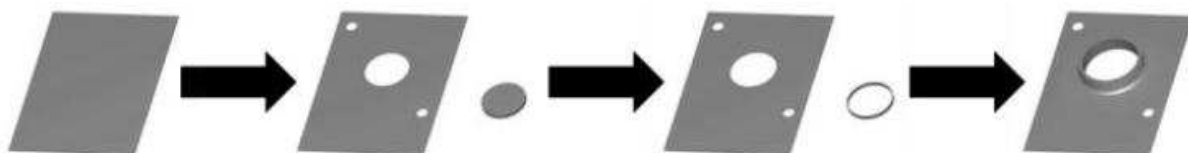


Obr. 65 Porovnání HER různých materiálů [60]

V těchto případech lze brát v potaz pouze technologii stříhání. Na dosažitelné hodnoty má vliv hlavně střižná vůle a otupení nástroje. Pokud ani při nalezení optimální střižné vůle není možné dosáhnout požadované výšky lemu, je nutné přistoupit k víceukrokovému stříhání, díky kterému je možné dosáhnout někdy i mnohonásobného zvýšení HER.

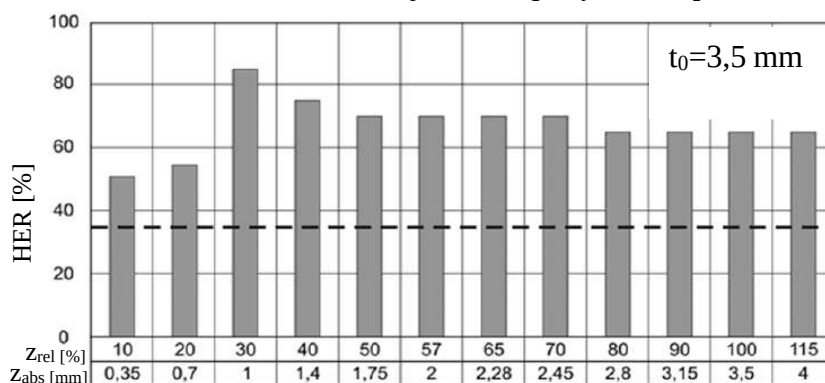
Nejprve se otvor prostříhne a v následující jedné nebo více operacích se pak ostříhne „prstýnek“ (viz obrázek 66) který má za cíl odstranit zpevnění z blízkosti střižné hrany. V literatuře se uvádí, že na hodnoty HER má dominantní vliv hlavně zpevněná oblast a až sekundární vliv kvalita povrchu střižné plochy, proto je odstranění zpevnění tak důležité. Průřez

„prstýnku“ musí být zvolen tak, aby odstranil co největší část zpevněné zóny, ale zároveň aby nebyl příliš tuhý, nekladl příliš velký odpor, a do materiálu se nevneslo opětovné zpevnění.

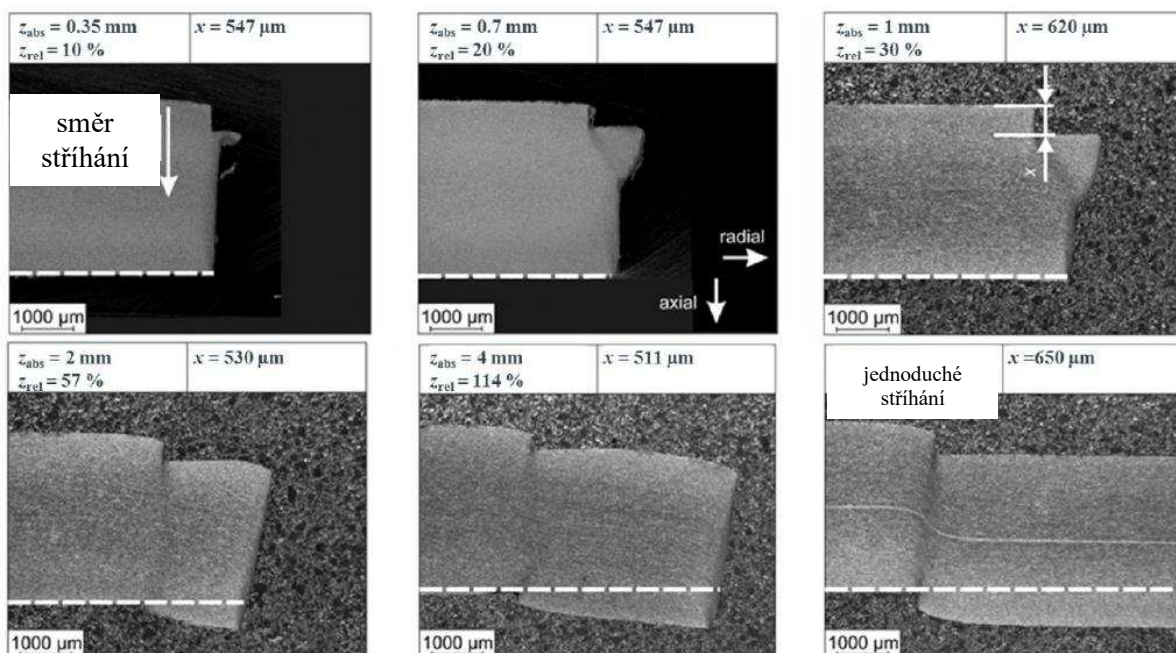


Obr. 66 Schéma výrobního postupu lemu otvoru s pomocí dvou krokového stříhání [61]

Nejčastěji se používá stříhání dvou krokové, ale v některých výrobních aplikacích se lze setkat i s tří krokovým stříháním. Třetí krok už však nepřináší výrazné zvýšení HER. Na obrázku 67 je vidět porovnání velikostí HER při různých podmínkách druhého stříhu u materiálu HDT780C. Na obrázku 68 jsou potom snímky ilustrující mechanismus oddělování materiálu pro různé parametry. Výsledky jsou porovnávány s referenční hodnotou získanou při rozšiřování otvoru zhotoveného jednoduchým stříháním – HER=35 %, kde z_{rel} je šířka „prstýnku“ v procentech tloušťky plechu t_0 , z_{abs} je šířka „prstýnku“ v milimetrech. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo se $z_{rel}=30$ %, kdy dosažené HER bylo více než dvojnásobné oproti jednoduchému stříhání. Na tomto příkladu je možné ilustrovat, jak významné a prospěšné je dvou krokové stříhání při přípravě díry pro lemování



Obr. 67 Porovnání parametrů druhého stříhu a dosažených hodnot HER [61]

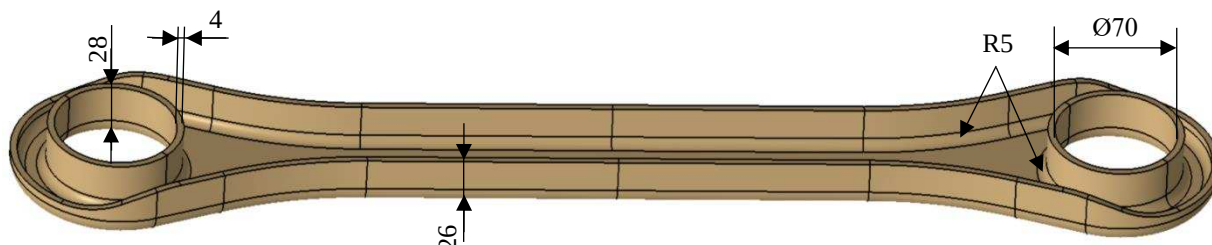


Obr. 68 Mechanismus oddělování materiálu při dvou krokovém stříhání [61]

otvorů.

5 NÁVRH VÝROBY

Vyráběným dílem je vylišovaná součást vodícího táhla do nápravy nákladního automobilu (viz obr. 69) z materiálu S420MC o tloušťce 4 mm. Jedná se koncept R&D týmu společnosti THK, která nedisponuje výrobními technologiemi plošného tváření. Jedním z cílů z prvotních cílů práce je ověřit vyrobiteľnost navržené součásti. Pro technologii výroby byl zvolen s uvážením výrobní série a tvaru součásti postupový sdužený nástroj. Výrobní série za 7 let výroby činí celkem 588 000 kusů. Nástroj bude zkonstruován s vedením, přesnost stříhání mezní úchylky tvaru a rozměru jsou definovány podle DIN ISO 2768-mL.



Obr. 69 Koncept plechového výlisku vodícího táhla [5]

Z hlediska technologičnosti konstrukce je důležitý vnitřní poloměr ohybu a průměr před zhotoveného otvoru pro vytvoření kruhového lemu. Na výrobním výkrese táhla je předepsán vnitřní poloměr ohybu 5 mm. V normě EN 10149-2 je stanoven minimální průměr trnu pro úhel ohybu 180° $0,5 \cdot t_0$, navržený poloměr 5 mm je tedy vyrobiteľný. Velikost otvoru pro následné vytvoření kruhového lemu je dána vztahem (2.16):

$$\begin{aligned} d_0 &= (D_L - t_0) + 0,86r_m + 1,43t_0 - 2h, \\ d_0 &= (78 - 4) + 0,86 \cdot 5 + 1,43 \cdot 4 - 2 \cdot 28 = 28,02 \text{ mm} \end{aligned}$$

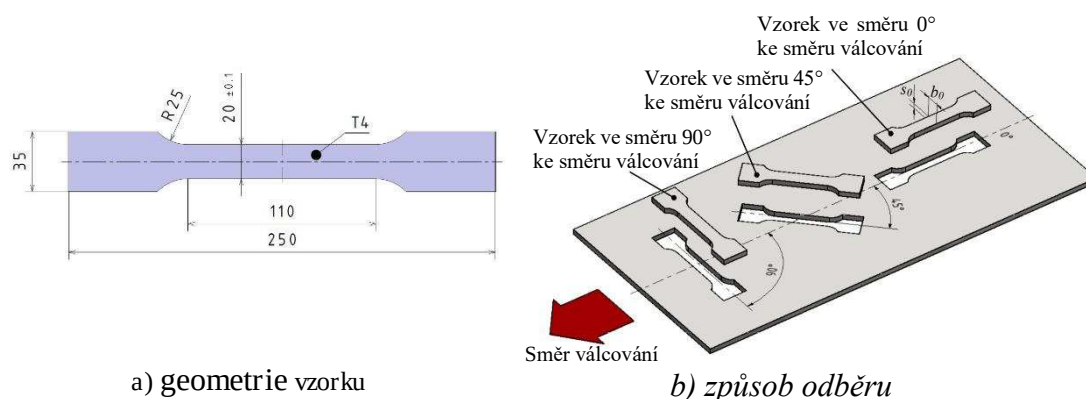
Z průměrů původního otvoru a finálního lemu plyne požadovaná minimální hodnota HER podle v rovnice (4.1):

$$HER = \frac{d_h - d_0}{d_0} \cdot 100 = \frac{70 - 28,02}{28,02} \cdot 100 = 149,8 \text{ [%]}$$

Vypočítaná potřebná minimální hodnota HER leží vysoko nad dosažitelnými hodnotami pro prostřížený otvor nejen materiálu S420MC, ale i komplexní oceli CP600/780, která z porovnání schopnosti rozšiřovat otvor vychází lépe než použitý materiál (viz obr. 65). V tomto případě by nepomohla ani změna technologie přípravy otvoru ze stříhání na třískové obrábění. Řešení tohoto problému se nabízí buď v podobě snížení výšky lemu, a tím snížení požadovaného HER, nebo v podobě změny postupu výroby oproti klasickému lemování otvorů v jedné operaci. Protože snížení lemu vede ke konstrukčnímu zásahu do nového návrhu designu vodícího táhla, bylo potřeba ověřit skutečné dosažitelné hodnoty HER. Pro případ, kdy by použití technologie řezání laserem pro přípravu otvoru bylo natolik výhodné, že by výška lemu nemusela být příliš snížena, byla kromě stříhání vzata v úvahu i ona. Jelikož se v návrhu technologie výroby počítá s využitím numerické simulace, bylo pro potřeby výpočtu nutné zajistit materiálový model. Je uvažováno užít programu PAM-STAMP, který se na plošné tváření specializuje, je pro jeho potřeby uzpůsoben a naprogramován. V jeho databázi se nachází celá řada materiálových modelů, mezi nimiž lze najít i Ympress S420MC od výrobce Tata Steel, který splňuje normu EN 10149-2. Dalším materiálem, který vyhovuje normě, je materiál Docol HR420Y480T HE od výrobce SSAB, který má v technickém listu uveden HER 90 %. Ympress i Docol mají mez kluzu, mez pevnosti, tažnost a další parametry lepší než požaduje norma, nicméně vzorky těchto materiálů se nepodařilo sehnat na českém trhu, proto bylo i z důvodů přesnosti výpočtů rozhodnuto, že se pro tento konkrétní případ vytvoří vlastní materiálový model z nakoupeného materiálu splňující normu EN 10149-2 pro S420MC. Zakoupený materiál pochází od výrobce Marcegaglia z Itálie.

5.1 Materiálový model pro numerickou simulaci [18]

Materiálový model pro numerickou simulaci vyžaduje modul pružnosti, mez kluzu, mez pevnosti, křivku zpevnění ve skutečném diagramu napětí-deformace, podmínku plasticity, koeficienty normálové anizotropie, koeficienty plošné anizotropie a křivku FLC. Pro potřeby konstrukce křivky zpevnění byly připraveny vzorky pro tahovou zkoušku, jejichž geometrie je vidět na obrázku 70a. Pro zjištění koeficientů anizotropií bylo potřeba odebrat vzorky v 0°, 45° a 90° vůči směru válcování (viz obr. 70b.) Pro každý směr byly k dispozici 3 vzorky.



a) geometrie vzorku

b) způsob odběru

Obr. 70 Odběr vzorků pro tahovou zkoušku [63]

Tahové zkoušky byly provedeny na zkušebním stroji ZD40. Jeho maximální zatížení je 400 kN, polohu snímá s přesností 0,01 mm a sílu s přesností ± 1 %. Pro vyhodnocení zkoušek bylo využito programu M-Test v.1.7. Křivka zpevnění byla sestrojena ze 3 vzorků odebraných v 0° vůči směru válcování, které byly zatěžovány až do porušení, viz příloha 1. Numerické simulace využívají závislost skutečného napětí na logaritmické deformaci, proto se hodnoty smluvního napětí a poměrné deformace z tahových zkoušek musely přepočítat podle následujících vztahů na hodnoty skutečné:

$$\varphi = \ln(1 + \varepsilon), \quad (5.1)$$

kde: φ je logaritmická deformace [-],
 ε je poměrná deformace [-].

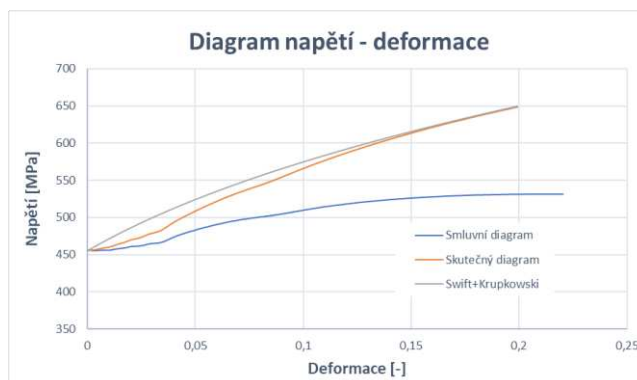
$$\bar{\sigma} = \sigma \cdot (1 + \varepsilon), \quad (5.2)$$

kde: $\bar{\sigma}$ je skutečné napětí [MPa],
 σ je smluvní napětí [MPa].

Tyto vztahy jsou použitelné pouze do meze pevnosti, poté se u tahové zkoušky jednoosá napjatost mění na trojosou. Skutečná křivka zpevnění je pro účely simulace proložena aproximační křivkou dle Swift-Krupkowského, aby byl výpočet zjednodušen a proběhl rychleji. Porovnání smluvního a skutečného diagramu napětí-deformace včetně aproximační křivky je zobrazeno na obrázku 71. Pro Swift-Krupkowského aproximaci křivky zpevnění platí následující vztah:

$$\bar{\sigma} = K \cdot (\varphi_0 + \varphi)^n \text{ [MPa]}, \quad (5.3)$$

kde: K je materiálová konstanta [MPa],
n je exponent deformačního zpevnění [-],
 φ_0 je posunutí křivky na ose deformace, aby procházela mezí kluzu [-].



Obr. 71 Diagram napětí deformace S420MC

Pro určení koeficientů normálové anizotropie, které vyjadřují nestejnorodost mechanických vlastností v různých směrech válcovaného plechu vzhledem ke směru válcování, se vzorek při tahové zkoušce zatíží na 20 % poměrného prodloužení a následně se změří jeho rozměry – tloušťka se šířkou ve stejných oblastech jako před zkouškou. Zpravidla se vzorek rozděljuje na 5 oblastí, aby výsledky nebyly ovlivněny případnou lokální nehomogenitou, foto vzorků viz příloha 1. Koeficienty se určují dle následujících vztahů:

$$R_{\alpha} = \frac{\varphi_w}{\varphi_t} = \frac{\ln \frac{w_0}{w_1}}{\ln \frac{t_0}{t_1}}, \quad (5.4)$$

kde: α je index označující směr odběru vzorku vůči směru válcování [°],
 t_1 je tloušťka vzorku po zatížení vzorku [mm].

$$\bar{R} = \frac{R_0 + 2 \cdot R_{45} + R_{90}}{4}, \quad (5.5)$$

kde: $\bar{R}$ je vážený průměr koeficientu normálové anizotropie [-].

Další důležitý údaj pro materiálový model je plošná anizotropie, které popisuje nerovnoměrnosti mechanických a fyzikálních mechanických vlastností v různých směrech vůči směru válcování a je definována touto rovnicí:

$$\sigma_{ReH\alpha} = \frac{R_{eH}(\alpha^\circ) - R_{eH}(0^\circ)}{R_{eH}(0^\circ)} \quad [-], \quad (5.6)$$

kde: $\sigma_{ReH\alpha}$ je koeficient plošné anizotropie pro horní mez kluzu [-].

V softwaru PAM-STAMP je plošná anizotropie definována mírně upraveným vztahem:

$$\sigma_{ReH\alpha} = \frac{R_{eH}(\alpha^\circ)}{R_{eH}(0^\circ)} \quad [-], \quad (5.7)$$

V příloze 1 jsou uvedeny všechny rozměry nedeformovaných a deformovaných vzorků pro určení koeficientů normálové anizotropie a v tabulce 2 jsou shrnuty hodnoty všech veličin získané z tahové zkoušky.

Tab. 2 Vstupní hodnoty pro model zakoupeného materiálu

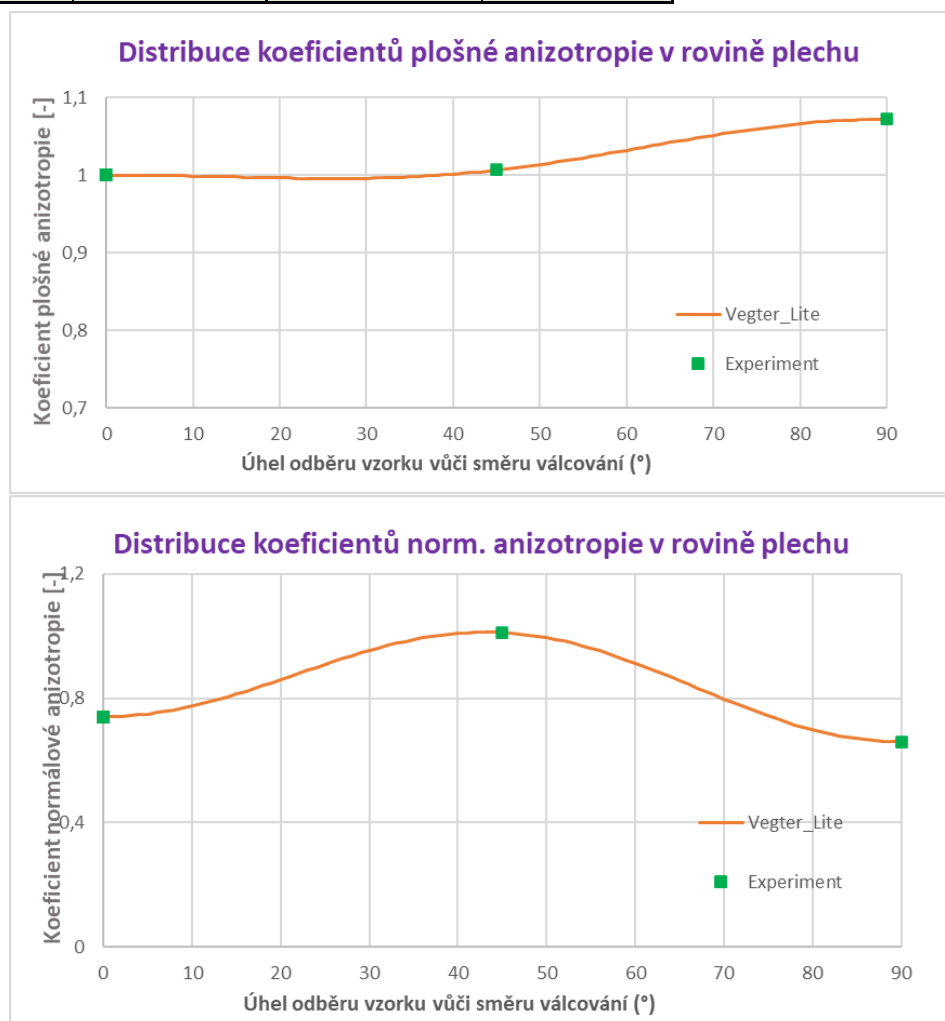
Veličina	Značka	Hodnota	Jednotka
Youngův modul pružnosti	E	210	[GPa]
Tažnost	A	27	[%]
Homogenní tažnost	A _g	21	[%]
Mez pevnosti v tahu	R _m	532	[MPa]
Horní mez kluzu v tahu	R _{eH}	455	[MPa]
Materiálová konstanta	K	922,8	[Mpa]
Exponent def. zpevnění	n	0,2702	[-]
Posun deformace	φ ₀	0,07304	[-]
koeficienty normálové anizotropie			
ve směru válcování (0°)	R ₀	0,740926	[-]
45° vůči směru válcování (45°)	R ₄₅	1,011535	[-]
kolmo na směr válcování (90°)	R ₉₀	0,659947	[-]
střední hodnota	$\bar{R}$	0,855986	[-]
koeficienty plošné anizotropie R_{eH}(α)/R_{eH}(0°)			
ve směru válcování (0°)	σ ₀	1	[-]
45° vůči směru válcování (45°)	σ ₄₅	1,006606	[-]
kolmo na směr válcování (90°)	σ ₉₀	1,071766	[-]

Zcela zásadní je pro přesnost a použitelnost materiálového modelu volba podmínky plasticity zahrnující anizotropii materiálu. Jednou z nejznámějších je podmínka Hill 48. Je to rozšířená podmínka plasticity HMM o koeficienty popisující anizotropii materiálu. Je poměrně jednoduchá a výpočty s ní jsou poměrně rychlé, avšak vede k nepřesnostem ve výsledcích hlavně při velkých deformacích. Výběr optimální podmínky plasticity byl proveden s pomocí nadstavby softwaru PAM-STAMP ESI MAT-WIZARD, která dokáže najít podle zadáných vstupů nejvhodnější podmínku. Kromě koeficientů normálové a plošné anizotropie se zadávají ještě koeficienty $R_b=1,1227$ a $\sigma_b=1,0296$ jenž byly softwarem aproximovány z koeficientů anizotropie, dále tzv. váhové faktory $w_{ps}=w_{sh}=0,6666$ (hodnota pro ocel), které ovlivňují tvar křivky Vegter lite, a exponent m (pro ocel $m=6$), jenž se uplatňuje v podmínkách dle Barlata.

Na základě vstupních dat byla vypočítána procentuální shoda hodnot reálného materiálu s podmínkami plasticity, jenž je vyjádřena tabulkou 3. Nejlepší shoda nastala s podmínkami plasticity Yoshida, Vegter 2017 a Vegter Lite. Z důvodu dobré shody s experimentem a zároveň jednoduchosti, co se týče počtu parametrů popisující podmínku plasticity, byla vybrána podmínka Vegter Lite. Graficky vyjádřenou shodu s experimentem ukazují obr. 72 a 73.

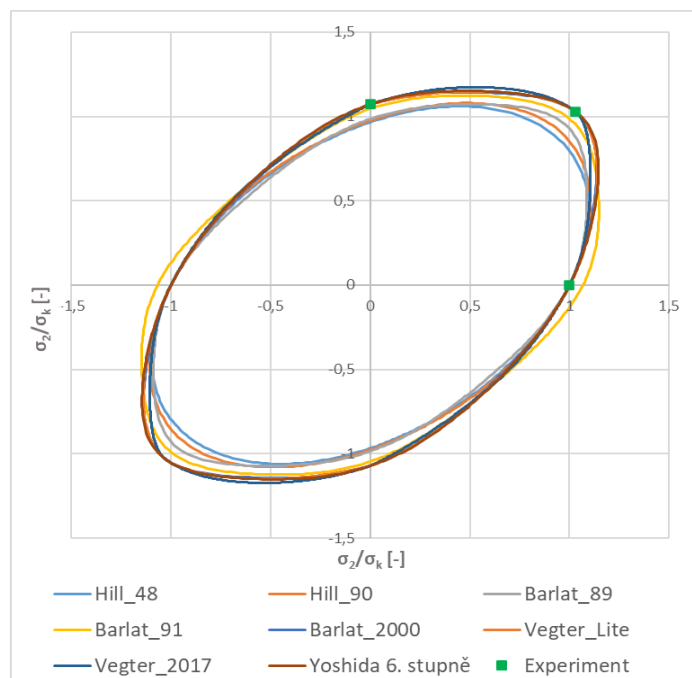
Tab. 3 Shoda experimentálních dat s podmínkami plasticity

Podmínka	Přesnost [%]	Podmínka	Přesnost [%]
Hill_48	79,9778	Barlat_2000	99,9067
Hill_90	75,4747	Vegter_Lite	99,999
Barlat_89	78,317	Vegter_2017	99,999
Barlat_91	89,1144	Yoshida	99,9999

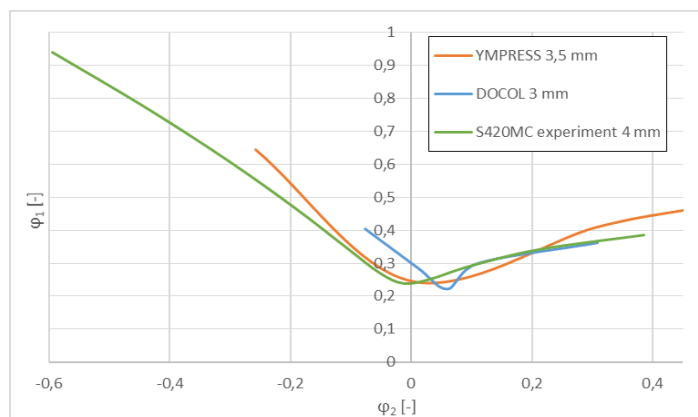


Obr. 72 Shoda podmínky plasticity Vegter Lite s experimentem

Aby byl materiálový model kompletní, chybí ještě doplnit křivku FLC do FLD diagramu. Standartně se k získání co nejpřesnějších výsledků stanovuje experimentálně, ale jelikož v tomto případě nebylo dostupné potřebné vybavení, byl použit výpočtový odhad v modulu ESI MAT WIZARD z dostupných experimentálních hodnot. Do výpočtu se kromě dat z tabulky 2 zadává ještě referenční tloušťka materiálu. Na obrázku 74 je zobrazena výsledná křivka FLC a pro srovnání je navíc přidána FLC křivka pro Ympress S420MC (tloušťka 3,5 mm) a Docol HR420Y480T HE (tloušťka 3 mm).



Obr. 73 Podmínky plasticity a experimentální data

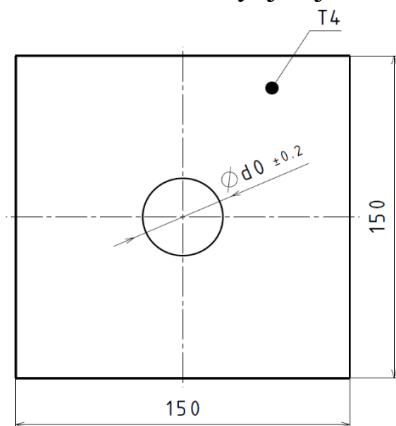


Obr. 74 Porovnání FLC jednotlivých materiálů

5.2 Experimentální zjišťování HER

V normě ČSN ISO 16630 je definován postup, jak přistupovat k experimentálnímu stanovování poměru rozšíření otvoru HER. Není v něm však například přesně stanoven vnitřní průměr matrice a poloměr jejího zaoblení. V řadě odborných článků, zabývajících problematikou citlivosti střižných hran ke vzniku trhlin, je normovaná metoda upravena do podmínek pro danou aplikaci nebo do podmínek, které jsou autorovi článku k dispozici. I v případě řešení problematiky návrhu výroby vodícího táhla bylo přistoupeno k určitým úpravám metodiky, aby výsledky byly co nejlépe využitelné pro konkrétní případ výroby lemu jako opory pro pouzdro pogumovaného čepu. Velikost otvorů před provedením testů byla zvolena tak, aby odpovídala předpokládaným výškám lemů. S uvažováním dosažitelných hodnot HER, byla navržena série 6

typů vzorků. Každá série obsahovala 3 kusy pro přípravu otvoru prostřížením a 3 kusy pro přípravu otvoru řezáním laserem. Protože je finální požadovaný průměr větší než ten, ze kterého bývá dosahováno při normalizované zkoušce, má i zkušební vzorek větší rozměry, jak je vidět na obrázku 75. Rozměry otvorů výpočtených dle vzorce (2.16) jsou uvedeny v tabulce 4. Nejmenší průměr je takový, který předpokládá vytvoření požadované výšky lemu dle výkresu a další rozměry odpovídají snížení lemu o 2 mm pro každou sérii vzorků. Společnost THK nedisponuje technologií stříhání, proto muselo být prostřížení děr ve vzorcích zhotoveno externí firmou. Bohužel se nepodařilo sehnat takovou, která by měla nástroje požadovaných velikostí, a proto některé velikosti děr musely být upraveny podle dostupných nástrojů. Dvě série stříhaných vzorků byly zhotoveny dvoukrokovým stříháním. Šířka ostříhnutého prstýnku byla opět dána možnostmi dostupných nástrojů. V obou případech dvoukrokového stříhání je to 1,5 mm. Rozměry prostřížených otvorů jsou též uvedeny v tabulce 4. U každého stříhu je navíc uvedena střížná vůle. Střížník se střížnicí byly pravděpodobně dimenzovány na menší tloušťku plechu, proto je uvedená vůle extrémně malá a pro sériovou výrobu nevhodná. Pro potřeby provedení experimentu to však postačuje.

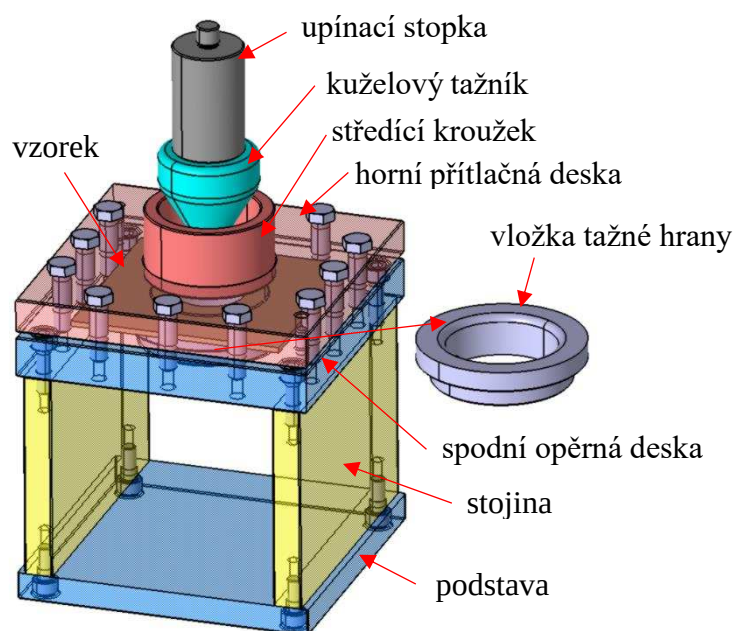


Obr. 75 Geometrie vzorku

Tab. 4 Rozměry děr vzorků

Výška lemu h [mm]	Průměr otvoru pro řezání laserem d_0 [mm]	Průměr otvoru po 1. stříhu [mm]	Střížná vůle [%]	Průměr otvoru po 2. stříhu [mm]	Střížná vůle [%]
28	28,02	28	1,4	-	-
26	32,02	28	1,4	31	1,6
24	36,02	42	0,9	-	-
22	40,02	42	0,9	45	0,7
20	44,02	45	0,7	-	-
18	48,02	50	0,8	-	-

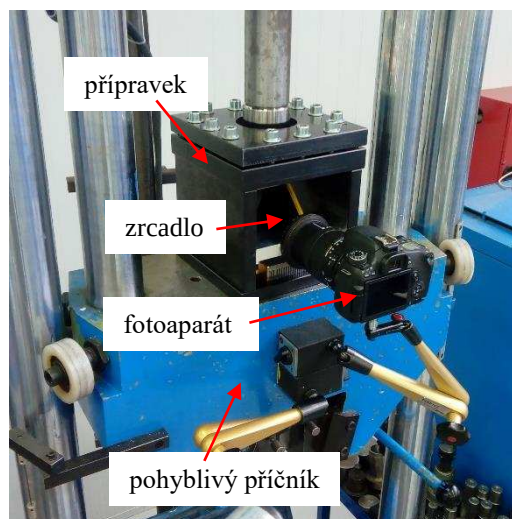
Pro potřeby testů byl navržen speciální přípravek, který je zobrazen na obrázku 76. Přípravek je uzpůsoben pro trhací stroj UPM 600 o maximální síle 600 kN s hydraulickým pohonem příčniku. Měření síly probíhá nepřímo přepočtem ze snímání tlaku oleje. Přesnost měření síly je 0,05 %. Kuželový tažník a vložka tažné hrany jsou z oceli 14 220 zušlechťené na min. 55 HRC a leštěné, ostatní konstrukční prvky jsou z konstrukční oceli 11 600. Vzorek je umístěn na spodní opěrnou desku, po přiložení horní přitlačné desky se pomocí středícího kroužku a kuželového tažníku s vrcholovým úhlem 60° a průměrem válcové části 70 mm vystředí vzorek vůči vložce tažné hrany a následně se utáhnou šrouby, aby nedošlo



Obr. 76 Přípravek pro testování HER

k vtahování materiálu do tažné vložky a tím k nepříznivému ovlivnění výsledků. Vložka tažné hrany má poloměr zaoblení 5 mm a průměr 78 mm. Poloha horní desky vůči spodní desce je vymezena dvojicí válcových kolíků. Po vystředění vzorku se sejme středící kroužek, kuželový tažník se přes upínací stopku upne do pevné příčky trhačího stroje a tělo přípravku s upnutým vzorkem se volně položí na posuvný příčník. Posuvem příčníku nahoru se ještě upraví vzájemná poloha přípravku a upnutého tažníku a v okamžiku kontaktu tažníku se vzorkem se spouští záznam měření závislosti tvářecí síly na posuvu tažníku. Tento záznam je následně použit při verifikaci materiálového modelu.

Proces tvorby lemu byl přes zrcátko natáčen digitálním fotoaparátem, jenž byl propojen s notebookem a mohl tak být online sledován vznik první trhliny procházející celou tloušťkou plechu, viz obr. 77. Pracovní rychlost tažníku byla zvolena na 10 mm/min. V reálném procesu výroby lemů je rychlost násobně vyšší, ale při těchto rychlostech by nebylo možné detekovat vznik trhliny a včas zastavit stroj. U některých testů byl i přes nízkou rychlost test zastaven pozdě a trhliny již byly příliš roztahené. Pro takové případy byl pořizován videozáznam, díky kterému by bylo možné určit přesnější okamžik vzniku trhliny zpětně, avšak kvalita videa bohužel nebyla natolik dobrá, aby mohl být okamžik výskytu první trhliny procházející skrz tloušťku plechu určen přesněji.



Obr. 77 Umístění přípravku na stroji

5.2.1 Vzorky s otvory zhotovenými laserem

V první sérii testů byly zkoušeny vzorky s otvory připravenými laserovým řezáním. Před testem byl změřen průměr otvoru ve dvou na sebe kolmých směrech, po testu ve čtyřech směrech pootočených vůči sobě o 45°. V obou případech bylo měření provedeno digitálním posuvným měřítkem s rozlišením 0,01 mm. Souhrn výsledků vzorku vypálených laserem je v tabulce 5. Podrobnější data pro každý vzorek zvlášť jsou pak v příloze 2.

Tab. 5 Výsledky rozšíření otvorů zhotovených laserem

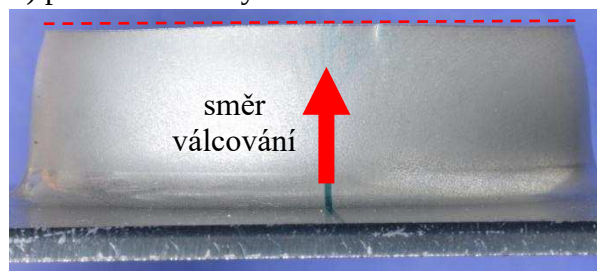
Sada děr [mm]	48	44	40	36	32	28
HER [%]	44,80	57,97	73,38	92,46	116,35	139,46

K výskytu trhlin došlo až těsně před rozšířením otvoru na 70 mm u velikosti původní díry 28 mm, která odpovídá výšce lemu 28 mm. Vzorek po testu je zobrazen na obrázku 78a. Zajímavá je poloha trhliny ve směru válcování plechu, která je v rozporu s předpokladem



a) pohled shora

b) pohled ze strany



Obr. 78 Vzorky připravené laserem po testu

výskytu ve směru nejnižší hodnoty koeficientu normálové anizotropie. Nejnižší hodnota byla zjištěna pro směr kolmý na směr válcování, ale je nižší jen o 0,08, což je téměř zanedbatelný rozdíl. Detail průchozí trhliny je na obrázku 79. Experimentálně stanovená průměrná dosažená hodnota HER pro vzorky připravené laserem je $HER=139,46\%$. To je o zhruba 10 % nižší než požadovaný výsledek. I v případě dokončení lemu bez objevení trhliny by tato metoda nebyla pro výrobu táhla příliš vhodná, protože čelo lemu je výrazně cípaté, jak je vidět na obrázku 78b, a zároveň stěna lemu je již výrazně ztenčena.



Obr. 79 Detail průchozí trhliny

5.2.2 Vzorky s otvory zhotovenými prostřihem

Ve druhé sérii testů přišly na řadu vzorky s prostřihnými otvory. Rozměry otvoru před a po experimentu byly opět měřeny digitálním posuvným měřítkem se stejným postupem. Přehled dosažených hodnot HER prostřihnutých otvorů je uveden v tabulce 6, podrobnější data jsou umístěna v příloze 3. Rozšíření díry na požadovaný rozměr 70 mm proběhlo bez výskytu trhlin

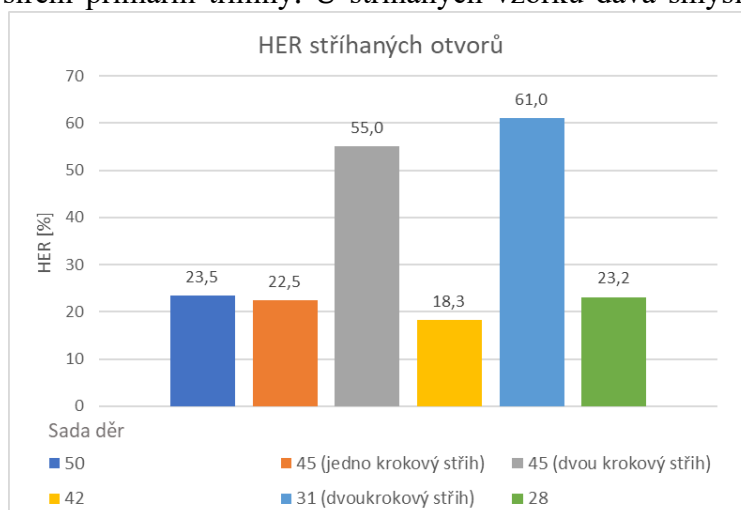
Tab. 6 Výsledky rozšíření otvorů zhotovených laserem

Sada děr [mm]	50	45/1S	45/2S	42	31	28
HER [%]	23,49	22,50	55,03	18,25	61,03	23,16
ETL [%]	8,73	8,90	23,20	5,46	23,40	9,84

pouze u série vzorků s $d_0=42$ mm, která byla zhotovena dvou krokovým stříháním. U ostatních sérií vždy došlo k výskytu trhlin dříve, než byl lem dokončen. Hlavně kvůli zhoršené kvalitě střížné plochy bylo obtížné rozeznat vzniklou trhlínu, a proto byl některý experiment zastaven příliš pozdě, jak je ilustrováno na obrázku 80. To vedlo ke zkreslení dosažených výsledků, ale pro porovnání vlivu druhého kroku stříhu na hodnoty HER byly provedené zkoušky dostačující. Pro přesnější výsledky by bylo potřeba zajistit vzorky s optimálně nastavenou střížnou vůlí a šířkou ostříhnutého „prstýnku“ a mít pro každou sérii větší počet vzorků. U stříhaných otvorů také nedocházelo k výskytu trhlin vždy ve stejné orientaci vůči směru válcování. To může být způsobeno například nerovnoměrným opotřebením nástrojů, vyoseného ustavení střížníku vůči střížnici nebo mikrotrhlinou vytvořenou při šíření primární trhliny. U stříhaných vzorků dává smysl minimální zjištěné hodnoty HER přepočítat na maximální dovolené ztenčení ETL podle vztahu (4.6), při kterém ještě nedochází k výskytu trhlin. Tato hodnota je aplikovatelná jak v numerických simulacích, tak při analýze tloušťky plechu u výlisků, kdy se stanovuje, jak se ztenčení blíží hraniční hodnotě znamenající defekt. Zajímavé je i porovnání hodnot HER jedno a dvoukrokového stříhání na obrázku 81. Hodnoty dvou krokového stříhání více než dvojnásobně převyšují hodnoty

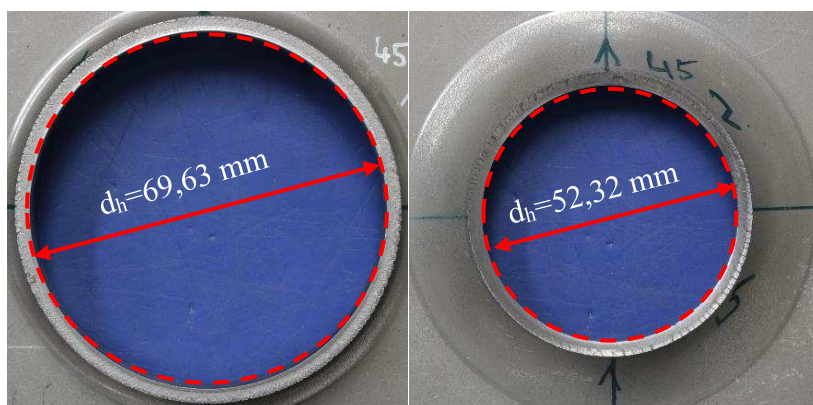


Obr. 80 Pozdě zastavený test



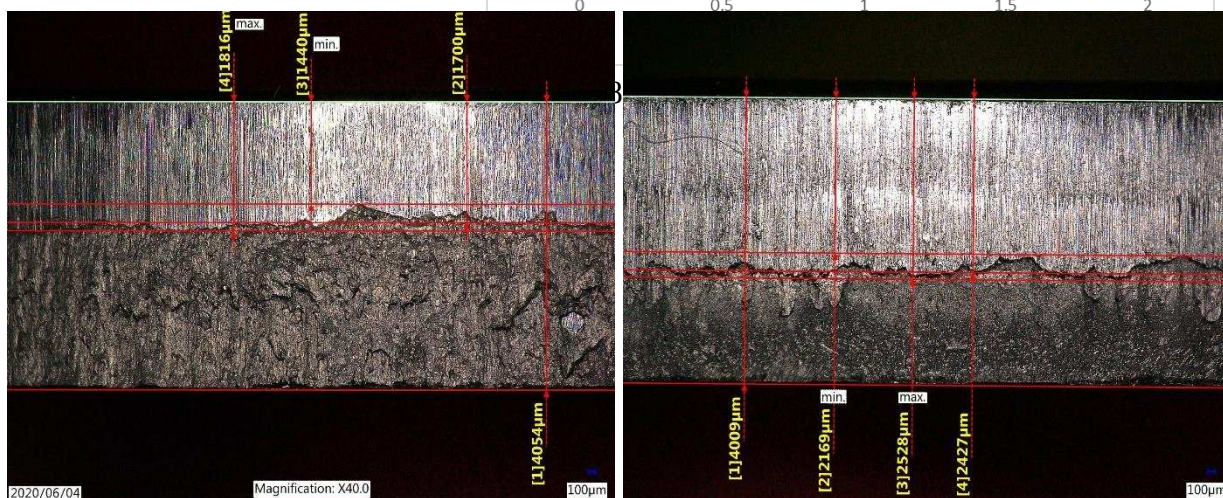
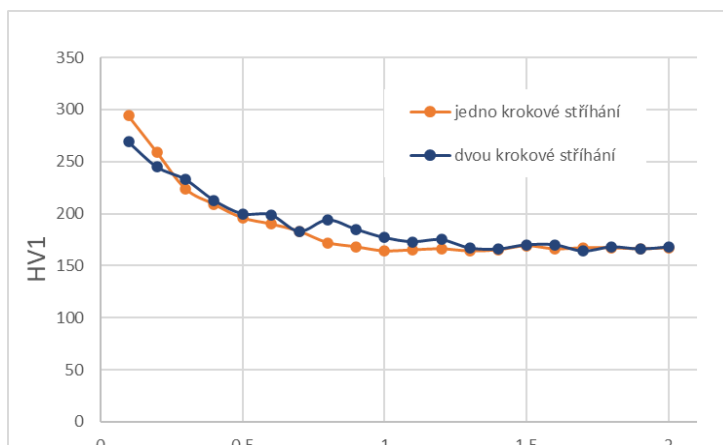
Obr. 81 Porovnání HER stříhaných otvorů

jedno krokového stříhání, a navíc jsou v poměrně dobré shodě mezi jednotlivými sériemi. Je však třeba poznamenat, že zobrazená hodnota je průměr a jednotlivé vzorky v rámci jedné série mezi sebou vykazovaly poměrně velký rozptyl i kvůli pozdnímu zastavení testu, viz příloha 3. Příznivý vliv druhého stříhu na schopnost materiálu rozšiřovat otvor je tedy nepochybný. Porovnání dvou vzorků se stejnou velikostí průměru výchozí díry $d_0=45$ mm, kde jeden je připraven jedno krokovým stříhem a druhý dvou krokovým, je na obrázku 82.



Obr. 82 Porovnání jedno a dvou krokového stříhání

Jak již bylo zmíněno, roztažnost otvoru je dána hlavně stavem povrchu hrany otvoru. Střížná hrana dvou vzorků proto byla podrobena měření tvrdosti. To probíhalo na tvrdoměru DuraScan od společnosti Struers metodou dle Vickerse se zátěží 9,807 N. Měření bylo provedeno ve směru od střížné hrany ke stříhem neovlivněnému základnímu materiálu a výsledky jsou znázorněny na obrázku 83. oproti očekávání se hodnoty tvrdosti pro jednu a dvakrát stříhaný vzorek příliš neliší. To mohlo být způsobeno tím, že při druhém stříhu nebyl „prstýnek“ ostřížen rovnoměrně a došlo k opětovnému zpevnění materiálu nebo naopak k nedostatečnému ostřížení zrovna v místě, ze kterého byl odebrán vzorek. Na fotografii střížných ploch však je rozdíl mezi jedno a dvou krokovým stříháním patrný. U dvou krokového stříhání je pásmo plastického přetvoření o něco větší než u stříhání jedno krokového.



a) jedno krokové stříhání

b) dvou krokové stříhání

Obr. 83 Střížná plocha vzorků

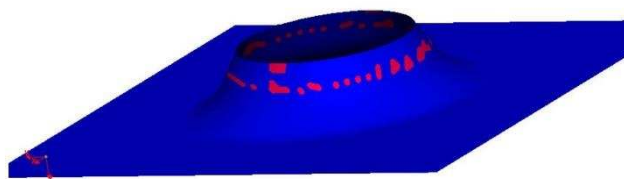
5.3 Experimentální ověření materiálového modelu

Ověření přesnosti materiálového modelu bylo provedeno na testech rozšiřování otvoru. Porovnávány byly průběhy tvářecí síly v závislosti na dráze tažníku a tloušťka plechu v závislosti na výšce lemu. Pokud se výsledky ze simulace a experimentu liší maximálně o 10 %, je možné materiálový model uznat za technicky přijatelný.

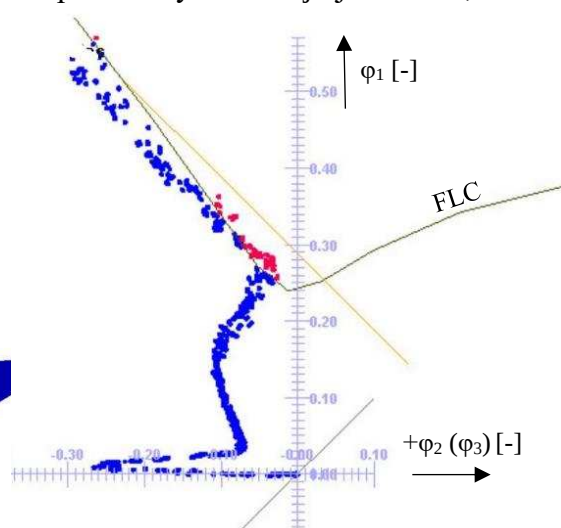
Pro přesnost výpočtu metodou konečných prvků, pomocí již úlohy řeší i PAM-STAMP, je zásadní volba elementárních prvků, ze kterých bude vytvořena konečno prvková síť nahrazující spojitě kontinuum. Musí mít vhodný tvar a velikost, aby dokázaly postihnout všechny děje, které v materiálu během tvářecího procesu probíhají. Pro použití skořepinových prvků je hraniční velikost hrany prvku rovná polovině tloušťky výchozího materiálu, a ne vždy je s ní dosaženo přijatelného výsledku. V případech, kdy skořepinové prvky nejsou schopny správně popsat reálný děj, musí být nahrazeny prvky objemovými. U nich zase platí zásada, že musí být alespoň tři prvky ve směru tloušťky plechu. V programu PAM-STAMP je při výpočtech s pomocí objemových prvků povoleno použít pouze podmínku plasticity Hill 48. Významnou roli ve výpočtech hraje tření. Tření je komplexní interakce mezi nástroji a tvářecím materiálem a závisí na spoustě faktorů. Do výpočtů se zavádí zjednodušeně pomocí součinitele smykového tření. Dalším důležitým parametrem výpočtu je tuhost nástrojů. Ve většině případů postačuje úlohu zjednodušit tím, že se nástroje zadají jako ideálně tuhé. Při analýze odpružení nesmí být normály sousedních elementů na deformované síti vůči sobě odkloněny o více než $11,25^\circ$.

V konkrétním případě simulace HET byly zvoleny čtyřúhelníkové skořepinové prvky se základní velikostí hrany prvku 2 mm. Součinitel smykového tření byl zvolen 0,12, což odpovídá tváření ocelového plechu za studena bez použití maziva. Nástroje jsou zjednodušeny na ideálně tuhé, pro potřeby výpočtu vytvořené pouze jako plošné modely. Přidržovací síla zvolena 200 tun, aby nedošlo k pohybu materiálu po spodní desce. Geometrie polotovaru (blanku) byla totožná se vzorky připravené laserem. Při tváření tlustých plechů je nutné brát v potaz, že na protilehlých površích mohou být zcela odlišná namáhání. Typickým příkladem je právě rozšiřování otvoru. Na straně přilehající k zaoblení tažné hrany převládá namáhání tlakem a na protilehlé straně jsou naopak vlákna natahována. Při zhodnocování výpočtů tedy není postačující kontrolovat pouze hodnoty na střední ploše součásti, kterou reprezentuje skořepinová síť, ale i na vnějších površích plechu. V PAM-STAMPU je toto umožněno výběrovou nabídkou. Lze si v ní zvolit, jestli chceme na síť prvků promítat výsledky tzv. horního vlákna, membrány nebo spodního vlákna. Výběr spodního nebo horního vlákna je indikován šipkou.

Přesnost shody výpočtového modelu s experimentem bude demonstrována na výpočtu blanku s počáteční velikostí díry 32 mm. Z výsledků provedených testů je již známo, že tato sada vzorků byla rozšířena bez vzniku porušení až na požadovaný průměr 70 mm. Při numerickém výpočtu se červeně zbarvené elementy z obrázku 84 a 85 dostaly nad hraniční křivku FLC ještě před dokončením lemu. Jedná se o vlákno přilehlé k tažné vložce. FLC tedy není vhodným kritériem předpovědi porušení pro testy rozšiřování otvoru.

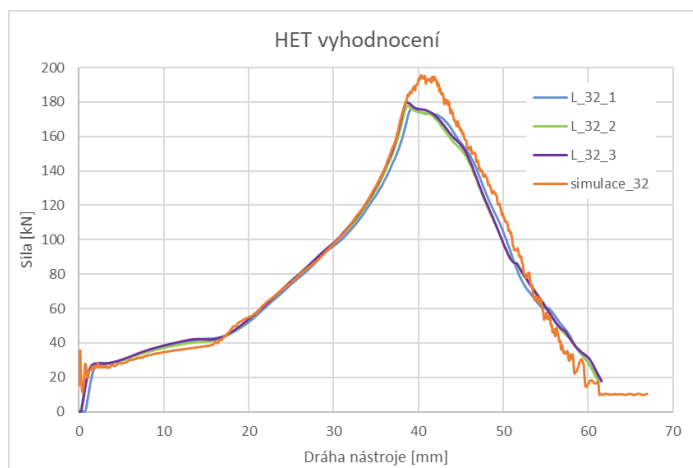


Obr. 86 Sít' prvků



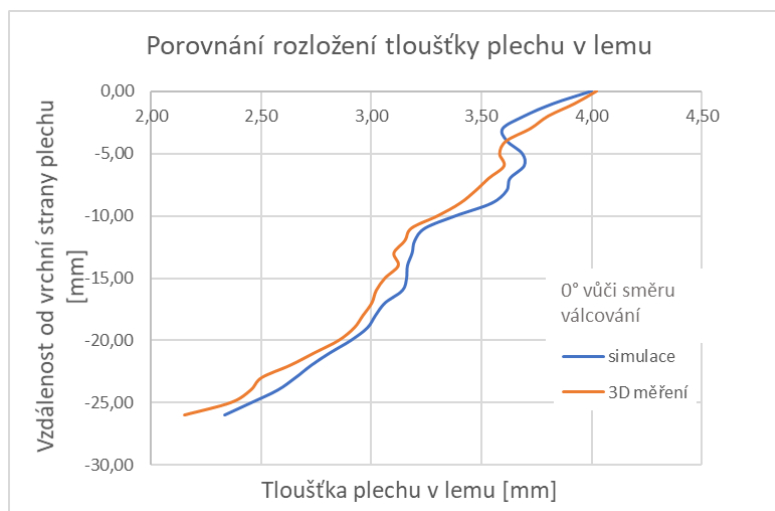
Obr. 85 FLD diagram

Na obrázku 87 je porovnání průběhu sil z numerické simulace a tří zkušebních vzorků. Mezi výsledky průběhu sil není výrazný rozdíl, měření mělo dobrou opakovatelnost. Síla na počátku měření po kontaktu nástroje se vzorkem nejprve strmě roste, aby po chvíli změnila směrnici a rostla pozvolněji. V tomto úseku se materiál dotýká nástroje pouze v kruhové linii, a kromě rozšiřování otvoru dochází k prostorovému ohybu přes poloměr zaoblení matrice. V místě, kde začne síla opět růst strměji a materiál přilehne na nástroj ve větší ploše, dochází k rychlejšímu rozšiřování otvoru a k posunu materiálu po povrchu tažníku směrem k jeho válcové části. Síla dosahuje maxima ještě dlouho před okamžikem, kdy se otvor rozšíří na požadovaný rozměr a v kontaktu s materiálem už zůstane pouze válcová část nástroje. Po celou dobu náběhu síly na maximální hodnotu jsou naměřená data v dobré shodě se simulací, avšak ve vrcholu křivky bylo naměřené maximum síly rovno 179,8 kN a maximum podle simulace 195,7 kN. Procentuální rozdíl výsledků tedy činí 8,84 %, což není daleko od hranice technické přijatelnosti, avšak výsledek je pořád ještě považován za vyhovující.



Obr. 87 Porovnání průběhu sil

Rozložení tloušťky plechu po výšce lemu je znázorněno na obrázku 88. Měření tloušťky plechu bylo provedeno na 3D souřadnicovém měřicím stroji pouze pro jeden myšlený řez vzorku totožný se směrem válcování. Výstupem měření byla sada souřadnic bodů, která byla následně vyhodnocena v CATII. Maximální přesnost tohoto způsobu vyhodnocení je $\pm 0,05$ mm, což odpovídá odchylce měření 1,25 %.



Obr. 88 Porovnání tloušťky plechu

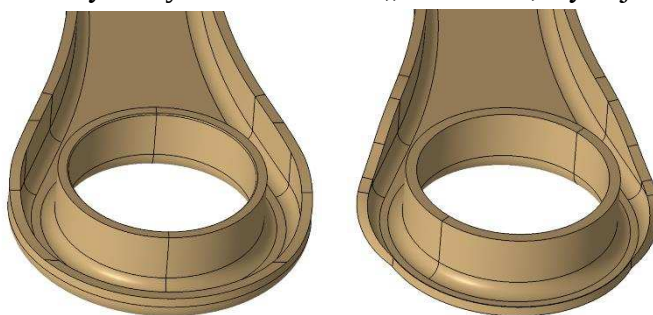
Největší rozdíl ve výsledcích simulace a měření nastal ve vzdálenosti 8 mm od vrchu plechu, kde činil rozdíl ve výsledcích 4,23 %. V součtu s nepřesností měření byla maximální odchylka 5,48 % a materiálový model tak lze považovat za spolehlivý i pro predikci rozložení tloušťky.

5.4 Výrobní postup [18]

Nejvyšší výrobitelná výška lemu při zachování klasického postupu výroby s využitím dvoukrokového stříhání je při uvážení bezpečné hodnoty $HER=55$ % (rozšíření otvoru z 45 mm na finální průměr 70 mm bez výskytu trhliny) rovna 19,5 mm. Takový zásah do návrhu konceptu ovšem není možný. Je tedy potřeba zvolit jinou metodu výroby. Jako vhodná varianta se jeví metoda popsaná v poslední odrážce kapitoly 3.1.7, která využívá několikanásobného tažení. Pro tuto metodu je nezbytné použití postupového sružené nástroje. Aby výlisky mezi sebou mohly být propojeny a posouvány nástrojem mezi všemi operacemi, došlo k malé

konstrukční úpravě v blízkosti kruhového lemu na straně k volnému okraji táhla, jak ukazuje obrázek 89.

Na začátku návrhu postupu výroby je zapotřebí určit velikost základního rozvinutého tvaru. Ten byl získán za pomoci rozvinu výlisku v modulu pro plechové díly 3D CAD softwaru CATIA V5 a je zobrazen na obrázku 90. Aby nebyla kontura tak „kostřbatá“, byla ještě zahlazena o přídavky podbarveny růžovou barvou. konturu je ještě třeba zvětšit o přídavek na postupové tažení, protože určitý objem materiálu bude spotřebován na přesun do vzniklého lemu. Jedna strana bude při tvarování lemu zablokována okolním materiálem a nelze tak použít dostupné vztahy jako například pro výpočet průměru rondelu při hlubokém tažení. Navíc má plech značnou tloušťku



Obr. 89 Úprava designu – vlevo starý, vpravo nový

a S420MC není zrovna materiál vhodný pro hluboké tahy. K návrhu postupu výroby je proto potřeba přistupovat s citem a bude v něm spoléháno především na numerickou simulaci včetně porovnání výsledků, vůči FLC, jelikož schémata deformace budou podobná hlubokému tažení a biaxiálnímu vypínání, pro které je FLC spolehlivá. Nicméně i tak byly při návrhu první operace brány na zřetel některé teoretické vztahy a doporučení pro návrh první tažné operace. K návrhu výroby vyšších nebo složitějších lemu je kromě teoretických znalostí potřebná jistá míra empirie, která v tomto případě byla nahrazena několika desítkami iterací numerických výpočtů.



Obr. 90 Rozvin součásti

K vytvoření dostatečné zásoby materiálu bylo navrženo, aby průměr tažníku při prvním tahu měl průměr 100 mm a hloubka vzniklé misky byla 43 mm. Poloměr zaoblení tažníku je zvolen dle doporučení ($8 \div 10 t_0$) jako $r_L = 40$ mm. Poloměr zaoblení tažné hrany tažnice r_m je 12 mm a tažná vůle 5 mm. Vzhledem k tloušťce materiálu a průměru tažníku byla zvolena hodnota součinitele pro první tah na $m_1 = 0,55$. Průměr fiktivního rondelu pro hluboký tah by se potom vypočítal podle následujícího vztahu:

$$D_r = 2 \cdot R_p = \frac{d_{t1}}{m_1} = \frac{100}{0,55} = 181,8 \text{ mm} \quad (5.1)$$

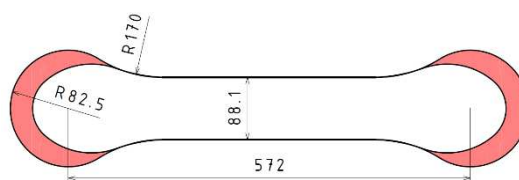
kde: D_r je průměr fiktivního rondelu pro 1. tažnou operaci [mm],

R_p je poloměr přístřihu pro 1. tažnou operaci v oblasti lemované díry [mm],

d_{t1} je průměr tažníku pro 1. tažnou operaci [mm],

m_1 je součinitel tažení pro 1. tažnou operaci [-].

Poloměr přístřihu je ještě snížen na hodnotu $R_p = 82,5$ mm, aby neúměrně nenarostl rozměr přístřihu, potažmo spotřeba materiálu. Finální tvar přístřihu je znázorněn na obrázku 91, kde je opět růžovou barvou znázorněn přidaný materiál oproti optimalizovanému tvaru rozvinu.



Obr. 91 Tvar přístřihu vodícího táhla

5.4.1 Numerická simulace

Pro výpočet návrhu postupu výroby byl použit vytvořený materiálový model pro ocel S420MC o tloušťce 4 mm. Pro ušetření výpočetního času byla použita poloviční symetrie. Velikost hrany skořepinového čtyřúhelníkového prvku byla zvolena na 2,5 mm, nástroje nastaveny jako ideálně tuhé, zdvih 50 mm, součinitel smykového tření $\mu = 0,12$ a směr válcování

nastaven do směru kolmého k podélné ose vodičího táhla. Přidržovací síla byla vypočtena podle následujícího vztahu:

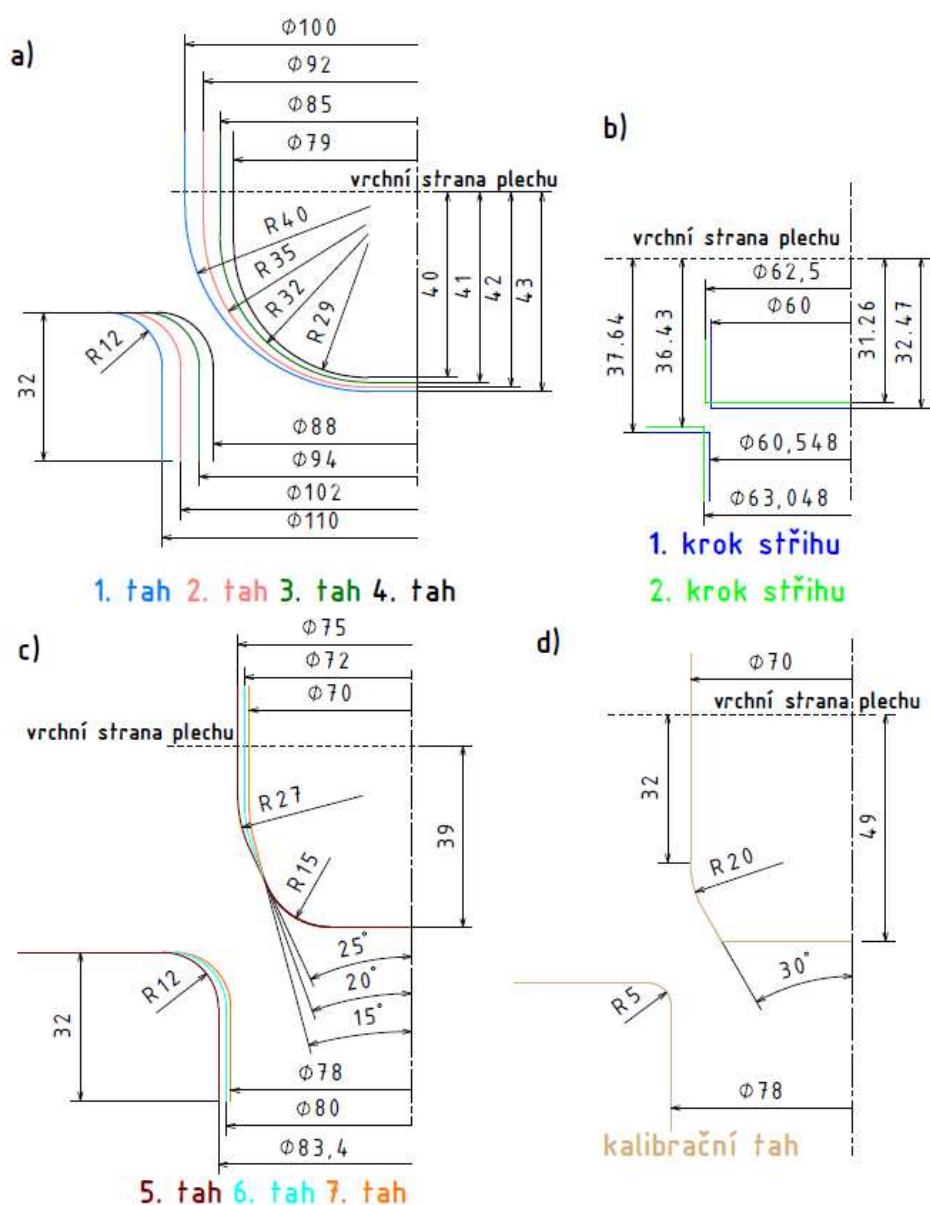
$$F_{p1} = S_p \cdot p_p = \left(S_{p\check{r}1/2} - \frac{\pi \cdot (d_{t1} + 2r_m)^2}{4} \right) \cdot p_p \quad (5.2)$$

$$F_{p1} = \left(40\,404 - \frac{\pi \cdot (100 + 2 \cdot 12)^2}{4} \right) \cdot 2,12 = 60\,054 \text{ N} \cong 60 \text{ kN},$$

kde: F_{p1} je síla vyvozená přidržovačem při tažení [N],
 S_p je plocha kontaktu přidržovače s výtažkem [mm²],
 p_p je měrný tlak přidržovače ($p_p = 2 \div 4$ MPa) [MPa],
 $S_{p\check{r}1/2}$ je plocha poloviny přístřihu [mm²],
 d_{t1} je průměr 1. tažníku [mm].

Pro operaci lemování byla přidržovací síla zvýšena na 100 kN.

Vyhovujících výsledků bylo dosaženo s geometrií tažníků a tažnic dle obrázku 92 (zobrazeno v poloviční symetrii). Po čtvrtém stupni tažení bylo do postupu výroby zařazeno



a) nástroje pro 1. – 4. tah

c) nástroje pro 5. – 7. tah

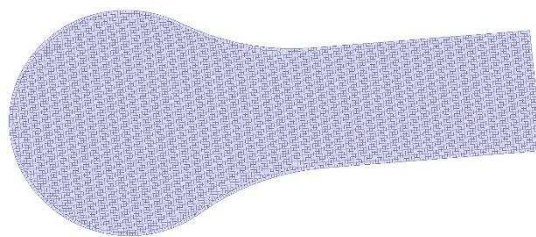
b) nástroje prostřihu díry

d) nástroje pro kalibraci

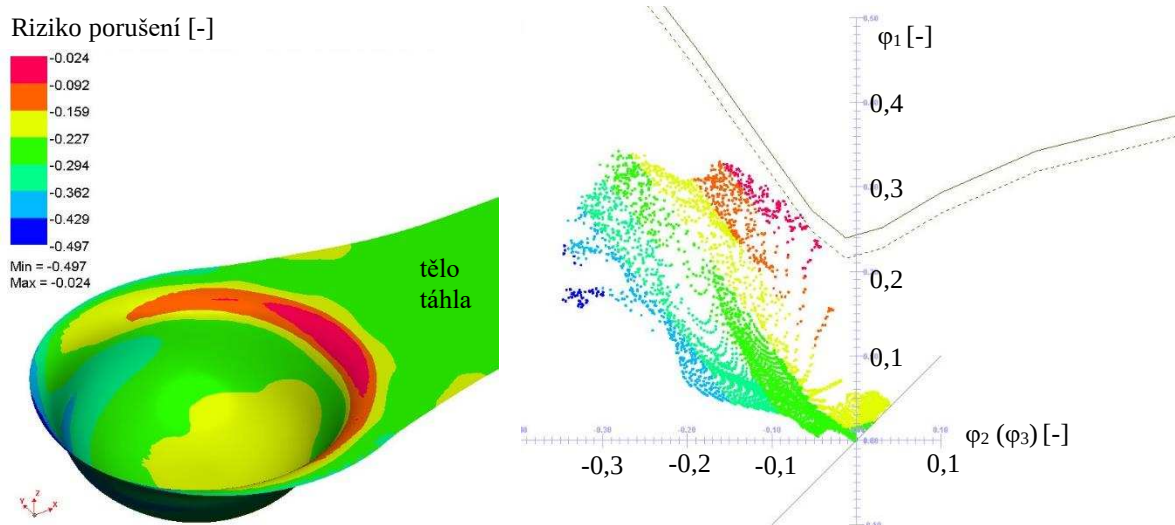
Obr. 92 Schéma rozměrů nástrojů pro výrobu lemovaného otvoru

dvoukrokové prostřížení dna, jelikož na protilehlé straně tažníků a ve vznikajícím lemu na straně orientované k tělu táhla, se neustále objevovaly nepřípustné tahové deformace. Tento problém se s prostřížením dna odstranil a proces výroby lemu tak mohl být v dalších třech tažných a jedné kalibrační operaci dokončen. Změna tvaru plechu mezi jednotlivými operacemi je dobře vidět ze screenů simulace v příloze 4. Přerušovaná čára na obrázku 92 značí vrchní stranu plechu při výrobním procesu a všechny tažníky jsou vůči ní ve stejné poloze jako při sevření nástroje. Tažnice jsou na obrázku odskočené kvůli lepší přehlednosti kótování. Střížníky i střížnice prostříhu díry jsou vůči přerušované čáře ve stejné poloze jako v nástroji v okamžiku dosednutí střížníků na materiál. Vytvoření přímých a vydutých lemů bylo provedeno až na závěr v poslední tvarovací operaci.

Na obrázku 93 je zobrazena síť prvků přístříhu s poloviční symetrií připravená pro výpočet. Na obrázku 94 je potom zobrazen tvar výlisku po první tažné operaci a hodnoty přetvoření v FLD diagramu. Výsledky jsou zobrazovány v módu tzv. rizika porušení nebo rizika prasknutí (rupture risk). Barevná škála se mění podle toho, jak je daný element vzdálen od limitní křivky ve směru hlavního přetvoření, tedy ve směru svislé osy K-G diagramu. Pokud jsou hodnoty záporné, elementy se nachází pod FLC a jsou-li kladné, nachází se nad ní a je předpovězen vznik porušení. Číselná hodnota představuje vzdálenost od FLC v hodnotách přetvoření φ_1 . Pokud například element ještě není přetvořen a jeho souřadnice v FLD odpovídají počátku souřadného systému, hodnota rizika porušení odpovídá vzdálenosti mezi počátkem a bodem, kde FLC protíná svislou osu. Tento způsob interpretace výsledků je



Obr. 93 Síť prvků připravená pro výpočet



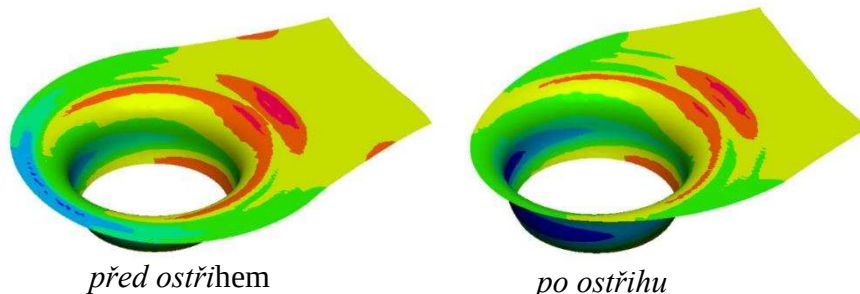
Obr. 94 Výsledky simulace po prvním tahu horního vlákna (strana přilehlá k tažníku)

vhodný pro identifikaci míst, které jsou nejnáchylnější ke vzniku praskliny a výhodou módu je i možnost zvolit vykreslení výsledků pro přilehlý nebo odlehlý povrch plechu. Ve všech módech interpretace FLD je přerušovanou čarou vykreslena odsazená křivka od FLC, která vymezuje pásmo kritických hodnot přetvoření. Z obrázku 93 je vidět, že nejbližší limitní křivce jsou elementy na vnější straně prostorového ohybu přes tažnou hranu na straně orientované k tělu táhla. Pořád se však všechny elementy nachází pod pásmem kritických hodnot přetvoření. I hodnoty přetvoření z protilehlého povrchu plechu jsou všechny pod FLC. Výsledky rizika porušení pro všechny operace a pro oba povrchy jsou uvedeny v příloze 4. po čtvrté tažné operaci je do vytaženého dna prostřížena díra. Z hlediska výpočtu se jedná o čistě geometrický ostříh. Elementy v blízkosti střížné hrany si nemohou nést žádnou informaci o zpevnění ani

kvalitě povrchu. Při použití čtyřúhelníkových prvků sítě a zakřivené hrany stříhu může nastat problém s deformací elementů sítě. Většinou po takovém stříhu vznikají trojúhelníkové elementy, které mohou zkreslovat výsledky. V takovém případě se doporučuje přítomnost těchto elementů nejbližší ve třetí řadě prvků od hrany.

Před kalibrací lemu bylo nutné ještě upravit tvar výlisku ostřihem přebytečného materiálu, aby odpovídal tvaru kontury rozvinu znázorněné na obrázku 90. Změna tvaru vlivem ostříhu je ilustrována

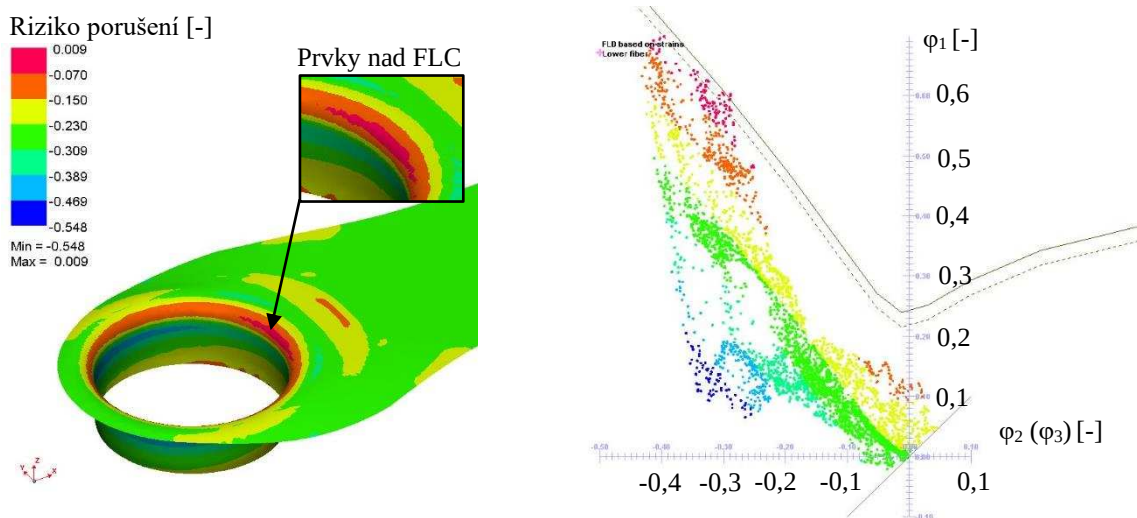
obrázkem 95. Při kalibraci válcového lemu se některé prvky dostaly mírně nad FLC (viz obr. 96), ale jedná se o místo na vnějším poloměru ohybu přes tažnou hranu



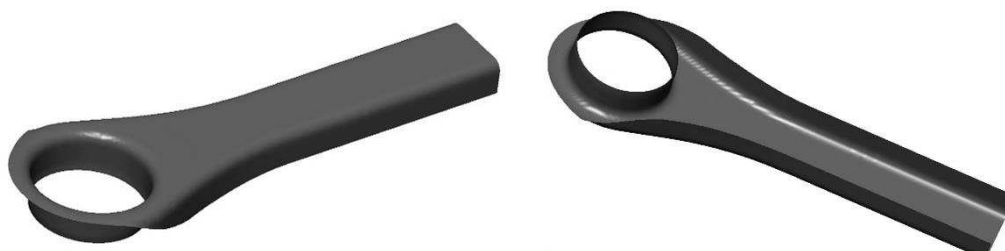
Obr. 95 Srovnání tvaru táhla před ostřihem a po ostřihu

a jak bylo popsáno výše, FLC není vhodné kritérium pro předpověď porušení při ohýbání. Otvor je při kalibrační operaci roztažen z 63,5 mm na 70 mm ($HER=10,2\%$) a i s uvažáním deformace materiálu od předchozích operací nedojde na střižné hraně k výskytu trhliny.

Stejný problém s prvky na FLC se objevil i u poslední lemovací operace, kdy se většina elementů na vnější straně ohybu dostala nad limitní křivku. V normě EN 10149-2 je pro materiál S 420MC deklarovaný minimální průměr trnu pro 180° ohyb $0,5 \cdot t_0$ a podle tahových zkoušek dodaný materiál této normě vyhovuje. Nesprávnost předpovědi porušení při ohybu s vnitřním poloměrem 5 mm byl potvrzen i při testech rozšiřování otvoru, a je průkazné, že k porušení v tomto místě nedojde. Finální lemování přímých a dutých lemů bylo provedeno s pevným tažníkem a pohyblivou tažnicí. Zaoblení hran tažnice bylo 20 mm. Finální tvar vylišovaného táhla podle simulace je zobrazen na obrázku 97.

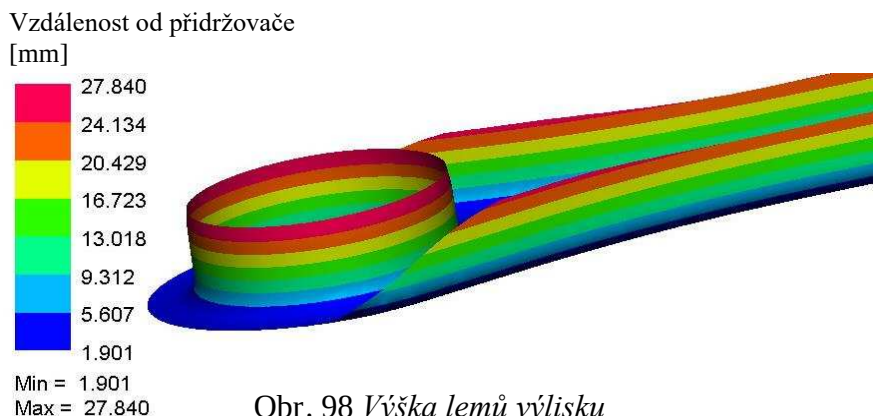


Obr. 96 Výsledky simulace po kalibraci lemu horní vlákna (strana přilehlá k přidržovači)



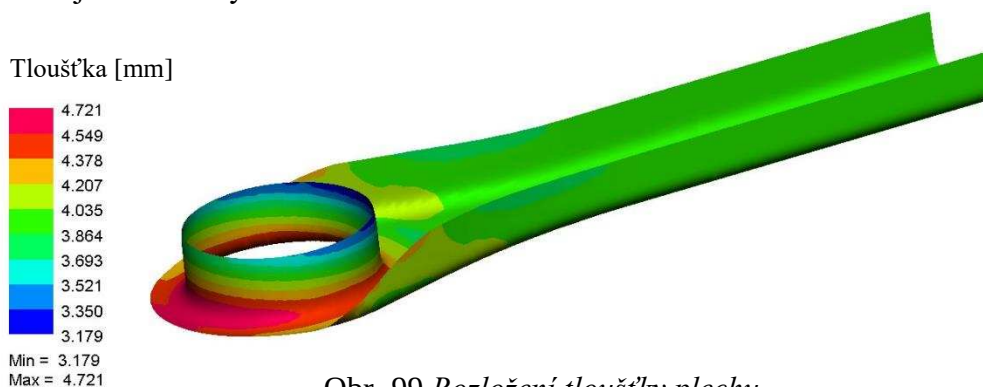
Obr. 97 Finální tvar výlisku po numerické simulaci

Dalším důležitým výstupem z výpočtů je výška lemu. Jak ukazuje obrázek 98, výkresem požadovaná výška lemu $28 \pm 0,2$ byla dodržena, ale blíží se spodní hranici tolerance. Lepšího výsledku by bylo dosaženo, pokud by prostřížený otvor měl průměr 62 mm.



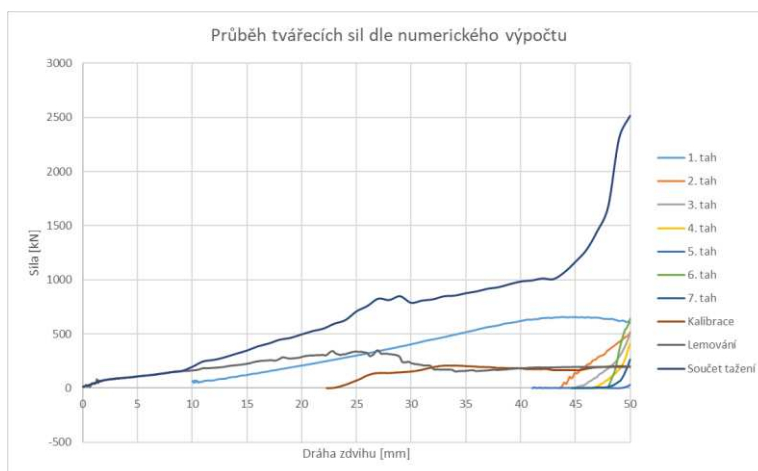
Obr. 98 Výška lemů výlisku

Na výrobním výkresu táhla je uvedena tloušťka stěny lemu 4 mm. Tu není možné z technologického hlediska dodržet. Po konzultaci s autorem výkresu byla uznána za přijatelnou výsledná tloušťka z numerické simulace, která v místě největšího ztenčení činí 3,179 mm. V porovnání s klasickým lemováním jde o výrazně vyšší hodnotu a válcový lem díky tomu může poskytovat lepší podporu pro pouzdro silentbloku. Hodnoty tloušťky plechu ve výlisku jsou uvedeny na obrázku 99.



Obr. 99 Rozložení tloušťky plechu

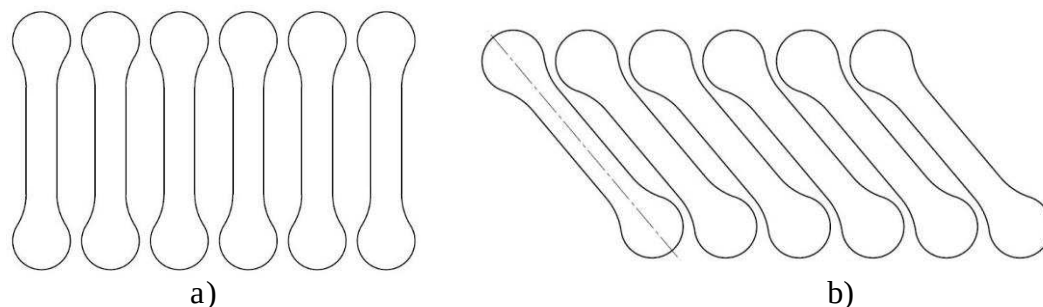
Stěžejní pro návrh a dimenzování nástroje a stroje pro výrobu jsou tvářecí síly. Hodnoty ze simulace pro jednotlivé operace kromě stříhání jsou uvedeny na obrázku 100. Maxima tvářecí síly je dosaženo při dolní úvratí nástrojů a je rovno 2515,2 kN. Jde o poměrně vysokou hodnotu odpovídající tloušťce plechu a rozměrům součásti a bude vyžadovat použití robustní konstrukce nástroje i stroje.



Obr. 100 Průběh tvářecích sil z numerické simulace

5.4.2 Nástřihový plán a volba polotovaru

V rámci hospodárné výroby je nutné správně zvolit vhodné rozmístění výstřižků na polotovaru. V tomto případě je možné uvažovat o polotovaru vzhledem k velikosti výlisku, tloušťce plechu, velikosti potřebných tvářecích sil a výrobní sérii pouze ve formě svitku. Rozmístění výstřižků připadá v úvahu více a je při nich třeba pamatovat na některé zásady jako například na minimální šířku můstku, minimální průměr prostřížené díry apod. Rozložení přístřihů pro výlisky bylo bráno v potaz prakticky pouze dvojí, obě možnosti jsou ukázány na



Obr. 101 Varianty rozmístění přístřihů

obrázku 101. Výhoda varianty a) je v jednodušší konstrukci nástroje, ale na druhé straně je horší využití materiálu. Varianta b) je složitější na konstrukci a celková délka nástroje bude větší než u varianty a). Volba optimální varianty závisí na procentuálním využití plechu. Přístřihy byly vůči sobě poskládány tak, aby mezi nimi byla alespoň 20 mm mezera z důvodu lepšího rozložení sil na tvarové střižníky a jejich menšímu opotřebení. Po stranách pásu plechu ještě musí zůstat prostor pro pásy, pomocí kterých bude plech veden ve vodících lištách a pro můstky, které budou výlisky s těmito pásy spojovat a umožňovat jejich posun ve směru lisování nástroje i po poslední lemovací operaci. Pro variantu a) byl krok stanoven na $k_a=185$ mm a šířka pásu na $b_{pa}=822$ mm, u varianty b) je krok roven $k_a=195$ mm a šířka pásu $b_{pa}=690$ mm. Procentuální využití materiálu se je spočítáno podle následujícího vztahu:

$$\eta_a = \frac{S_{př}}{S_{pola}} \cdot 100 = \frac{S_{př}}{k_a \cdot b_{pa}} \cdot 100 = \frac{80\,808}{185 \cdot 822} \cdot 100 = 53 \% \quad (5.3)$$

kde: η_a je využití plechu varianty a) z obr. 101 [%],

S_{pola} je plocha polotovaru jednoho kroku varianty a) z obr. 101 [mm²],

k_a je délka kroku pro variantu a) z obr. 101 [mm],

b_a je šířka pásu plechu pro variantu a) z obr. 101 [mm].

$$\eta_b = \frac{S_{př}}{S_{polb}} \cdot 100 = \frac{S_{př}}{k_b \cdot b_{pb}} \cdot 100 = \frac{80\,808}{195 \cdot 690} \cdot 100 = 60 \%$$

kde: η_b je využití plechu varianty b) z obr. 101 [%],

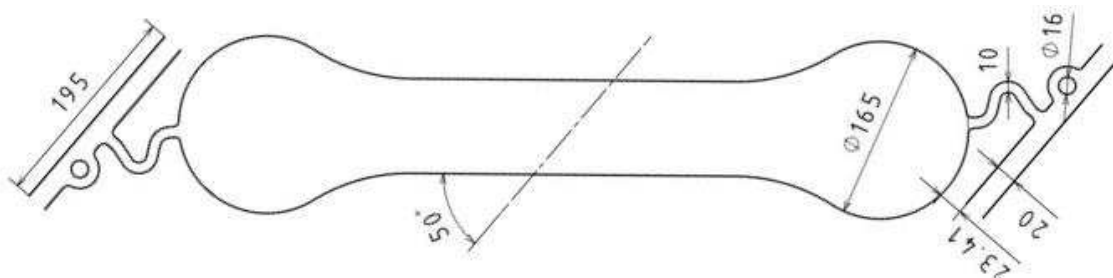
S_{polb} je plocha polotovaru jednoho kroku varianty b) z obr. 101 [mm²]

k_b je délka kroku pro variantu b) z obr. 101 [mm],

b_b je šířka pásu plechu pro variantu b) z obr. 101 [mm].

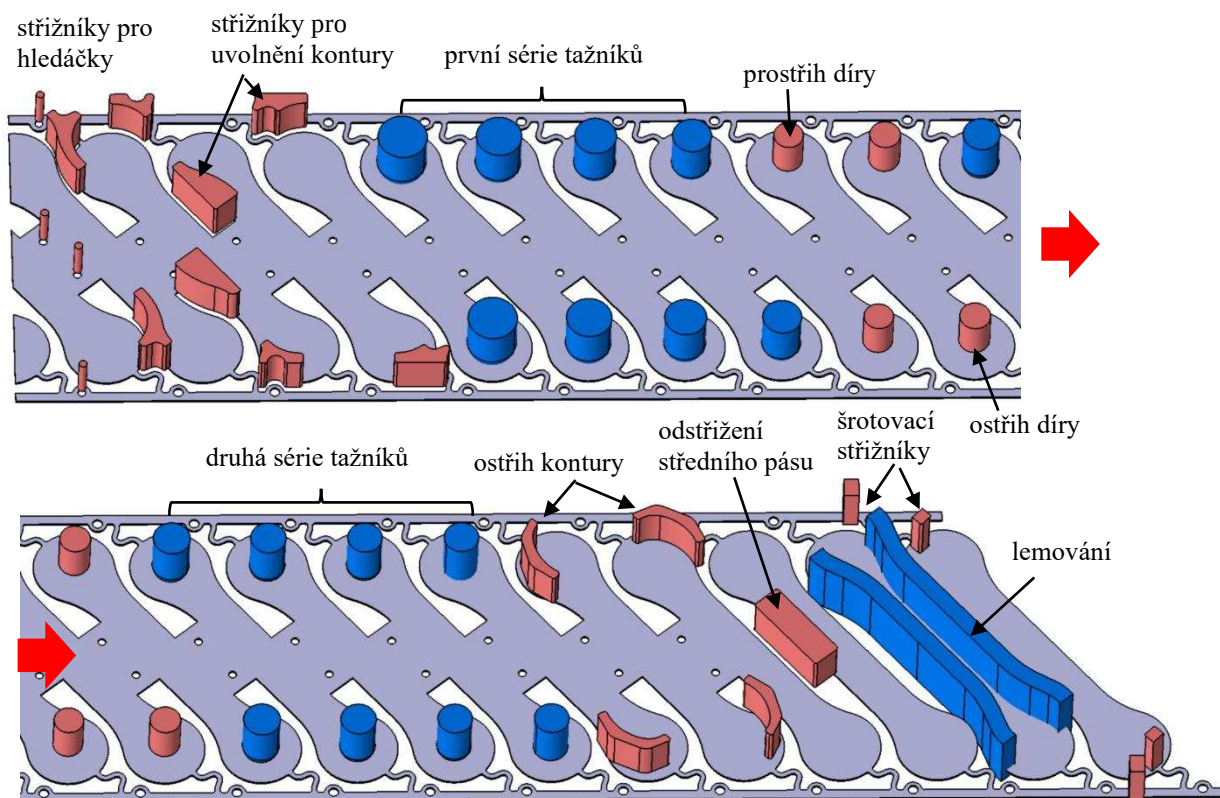
Varianta b) využívá o 7 % materiálu víc, než varianta a), a proto byla vybrána i za cenu složitější konstrukce postupového nástroje. U varianty b) hraje roli úhel sklonu podélné osy přístřihu k ose pásu plechu. Jako optimální pro úsporu materiálu a zároveň únosnou délku nástroje byl zvolen úhel 50°. Šířka pásu plechu tedy činí 690 mm a krok 195 mm. Na obrázku 102 je zobrazen tvar přístřihu včetně můstků a pásků pro vedení v nástroji základního kroku. Materiál bude kromě pásků na okraji spojen ještě středním pásem, jehož spojitost bude narušena až těsně před poslední operací lemování. Tím bude zajištěna dostatečná přesnost posuvu plechu nástrojem. Na obrázku 103 je zobrazeno rozmístění střižných, tažných a lemovacích nástrojů v postupovém nástroji. Pás plechu nemá skutečnou podobu jako v reálném procesu, ale jen

ilustruje velikost základního kroku, pozici hledáček a podobu středního pásu. Na začátku jsou umístěny 4 střížníky pro technologické otvory, pomocí kterých bude v následujících operacích zahledán materiál. Před tažnými operacemi jsou umístěny 4 typy tvarových střížníků a střížnic, jenž mají za úkol povolit konturu pro první tažnou operaci a materiál mohl být vtažen do



Obr. 102 Základní krok posuvu pásu plechu

tažnice. Můstky, spojující přístřih s páskem pro vedení, musí mít tvar a průřez takový, aby při vtažení materiálu nedošlo k jejich přetržení a aby mohly plnit svoji funkci zejména na konci výrobního procesu. S přihlédnutím na váhu jednoho hotového výlisku 2,3 kg a stabilitu při stříhání byla zvolena šířka můstku 10 mm. Aby při narovnávání můstku během první tažné operace nebyl deformován i krajní pásek, je do okolí jejich spojení umístěn technologický otvor pro hledáček, který deformaci pásu eliminuje. Šířka krajního pásu pro vedení byla zvolena na 20 mm. Za tvarovými střížnými nástroji se nachází tažné nástroje pro první až čtvrtý tah, za nimi jsou střížníky a střížnice prostřihu a ostřihu otvoru. Po nich přichází na řadu další čtyři dvojice tažníků a tažnic, následují střížníky a střížnice ostřihu kontury, které musí být rozděleny



Obr. 103 schéma rozmístění nástrojů

na dvě části, aby zůstal zachován můstek mezi výliskem a páskem. Před lemováním musí být prostřižen střední pás a po lemování obvodu táhla jsou už jen šrotovací střížné nástroje pro oddělení můstku od dílce a dělení vodícího pásu na menší kousky. Celkem se pro získání finálního tvaru musí pás plechu posunout dvacetkrát.

5.4.3 Výpočet střížné vůle a střížné síly [18], [64]

Střížná vůle je důležitým parametrem stříhání. Ovlivňuje kvalitu střížné plochy a také zatížení stroje. Pro plech s tloušťkou 4 mm se střížná vůle vypočítá dle vztahu (2.1). Koeficient určující způsob stříhání c_s byl zvolen 0,007.

$$z_s = \frac{v_s}{2} = 0,32 \cdot (1,5 \cdot t_0 \cdot c_s - 0,015) \cdot \sqrt{\tau_s}$$

$$z_s = \frac{v_s}{2} = 0,32 \cdot (1,5 \cdot 4 \cdot 0,007 - 0,015) \cdot \sqrt{0,77 \cdot 620} = 0,189 \text{ mm}$$

$$v_s = 2 \cdot z_s = 2 \cdot 0,189 = 0,378 \text{ mm}$$

U všech stříhů během procesu výroby je výstřížek odpadem a o střížnou vůli, respektive střížnou mezeru, musí být zvětšeny rozměry střížnic.

Střížná síla se určuje podle vztahu (2.5). Hloubka vniknutí střížné hrany h_s není známa a ve výpočtech bude zanedbána. Koeficient vlivu vnějších podmínek je volen na horní hranici rozmezí a je roven 1,3. Z tahových zkoušek je vidět že mez pevnosti nepřekračuje 550 MPa, avšak nástroj a stroj musí být dimenzovány na maximum meze pevnosti, které definuje norma, tedy 620 MPa. Ukázkový výpočet střížné síly je proveden pro střížník hledáček a výsledky ostatních výpočtů střížné síly jsou uvedeny v tabulce 7. Hodnoty střížných sil pro jednotlivé skupiny jsou uvedeny v tabulce 8 a identifikace tvarů tažníků je zobrazena na obrázku 104.

$$F_{sa} = n_s \cdot L(t_0 - h_s) \cdot \tau_s = n_s \cdot \pi \cdot d_{hled} \cdot t_0 \cdot 0,77 \cdot R_m$$

$$F_{sa} = 1,3 \cdot \pi \cdot 16 \cdot 4 \cdot 0,77 \cdot 620 = 124\,783 \text{ N},$$

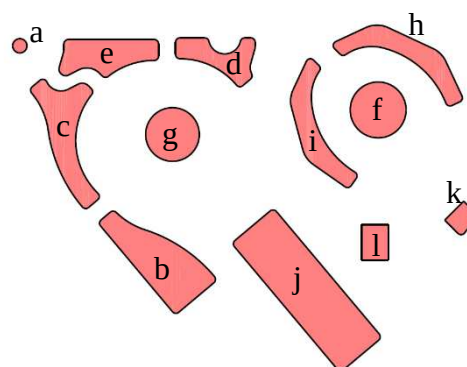
kde: d_{hled} je průměr střížníku pro hledáček [mm].

Tab. 7 Střížné síly

označení	název	číslo skupiny	počet kusů	délka střížné hrany [mm]	střížná síla [N]	střížná síla [kN]	poloha začátku stříhu [mm]
a	Hledáček	1	4	50,3	499132	499,1	29
b	Střížník 1	2	2	374,4	2E+06	1858,9	35
c	Střížník 2	6	2	318,0	2E+06	1578,9	44
d	Střížník 3	4	2	241,6	1E+06	1199,5	38
e	Střížník 4	5	2	252,7	1E+06	1254,6	41
f	Prostřih díry	3	2	188,5	1E+06	1209,6	32
g	Ostřih díry	3	2	196,3	1E+06	1260,0	32
h	Ostřih kontury 1	5	2	164,4	816239	816,2	41
i	Ostřih kontury 2	6	2	155,6	772548	772,5	44
j	Odstřih můstku	4	1	357,6	887735	887,7	38
k	šrot. střížník tvar.	1	2	20,0	99299	99,3	26
l	šrot. střížník rovný	1	2	20,0	99299	99,3	26
					celkem	11535,8	

Tab. 8 Skupiny střížníků

sk.	Střížná síla [kN]
1	697,7306
2	1858,881
3	2469,632
4	2087,269
5	2070,885
6	2351,405



Obr. 104 Označení tažníků

Celková střížná síla vychází 11 535,8 kN, a proto muselo dojít k rozdělení střížníků do skupin, aby střížná síla nebyla v jeden okamžik příliš vysoká a nedošlo k přetížení stroje. Sice se tím zvýší opotřebení střížníků, které se budou vnořovat hlouběji do střížnic, ale sníží se tím rázy a nástroj bude pracovat klidněji, bude moci být umístěn na slabší lis a bude vyžadovat menší nároky na tuhost konstrukce.

5.4.4 Výpočet přidržovací, stírací a zvedací síly [64]

Funkci přidržovače budou v nástroji plnit vodící desky společně se stíracími deskami. Pro snadnější montáž a údržbu budou rozděleny do dvou celků. Menší celek bude obsahovat vedení a stírání u střížníků „a“ až „e“ a druhý, větší, celek je určen pro vedení a stírání všech zbylých operací. K vyvození stírací a přidržovací síly je uvažováno použití mezi sebou propojených plynových pružin svedených do kontrolní armatury. Stírací síla pro menší celek se vypočítá dle následujícího vztahu:

$$F_{stir1} = 0,1 \cdot F_{smax1} = 0,1 \cdot 1\,858,9 = 185,89 \text{ kN} \quad (5.4)$$

kde: F_{smax1} je maximální střížná síla z prvního celku [kN]

Celková přidržovací síla pro tvářecí operace je vypočtena podle následujícího vztahu:

$$F_{pcelk} = (P_{to} \cdot F_{p1} + F_{p2}) \cdot 2 = (8 \cdot 60 + 100) \cdot 2 = 1\,160 \text{ kN}, \quad (5.5)$$

kde: F_{pcelk} je celková přidržovací síla pro tvářecí operace [kN],

P_{to} je počet tažných operací [-],

F_{p2} je síla vyvozená přidržovačem při lemování [N],

číslice 2 značí poloviční symetrii při numerické simulaci.

Přidržovací síla při zvedání nástroje ze spodní úvratě působí zároveň jako síla stírací. Nastavení plynových pružin bude takové, aby požadovaná síla byla dosažena při polovině pracovního zdvihu.

Zdvihání pásu plechu do transportní výšky bude prováděno pomocí 20 ks vysokozdvížných zařízení se sloupkovým vedením od výrobce FIBRO se zdvihem 50 mm. Zvedací síla je vyvozena plynovými pružinami s počáteční silou 0,9 kN. Celková zvedací síla je vypočtena podle tohoto vztahu:

$$F_{zdvih} = 20 \cdot F_{zj} \cdot k_p = 20 \cdot 0,9 \cdot 1,27 = 22,86 \text{ kN}, \quad (5.6)$$

kde: F_{zj} je počáteční síla zdvihací jednotky [kN],

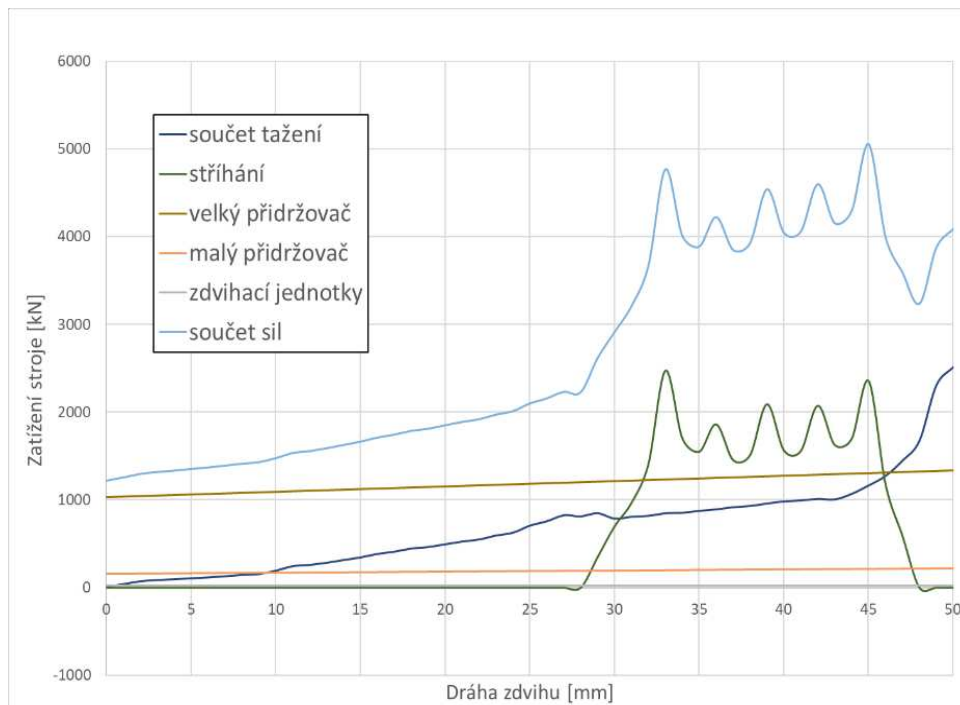
k_p je faktor navýšení tlaku při stlačení zdvihací jednotky o 50 mm [-].

Zdvihací jednotky musí překonat tíhu pásu plechu zavedeného do nástroje, a zároveň plnit funkci odlepování materiálu ze střížnic a tažnic. Na zdvihání plechu se podílí ještě 5 zdvihacích kolíků v oblasti prvních střížníků. Odlepování materiálu ze stíracích desek zajišťuje 50 malých odlepovačů. Odlepovače odpadu jsou umístěny i na děrovacích střížnicích. Síly pro stlačení těchto prvků jsou v celkovém měřítku tvářecích a přidržovacích sil zanedbatelné a nebyly zahrnuty do výpočtů celkové síly.

5.4.5 Volba tvářecího stroje [65], [66]

Nejdůležitějším kritériem pro výběr stroje zajišťující výrobu konkrétní součásti je jeho jmenovitá síla, která je porovnávána s maximální tvářecí silou potřebnou k získání požadovaného tvaru dílce. Síla stroje musí být samozřejmě vyšší než síla tvářecí a u některých výrobců je maximální přípustné zatížení stroje ještě sníženo o 20 % jmenovité síly, aby nedocházelo k jeho zbytečně rychlému opotřebení. V případě výroby vodícího táhla činí maximální síla, kterou musí lis překonat, 5,057 MN. Průběh síly v závislosti na pracovním zdvihu je znázorněn na obrázku 105. Při výběru vhodného lisu je též požadováno, aby měl dostatečně velký pracovní stůl, aby na něj mohl být umístěn nástroj s délkou větší než 4 metry. Uvedené podmínky splňuje servolis Kaiser 8000–50–F5–RKM se jmenovitou silou 8000 kN

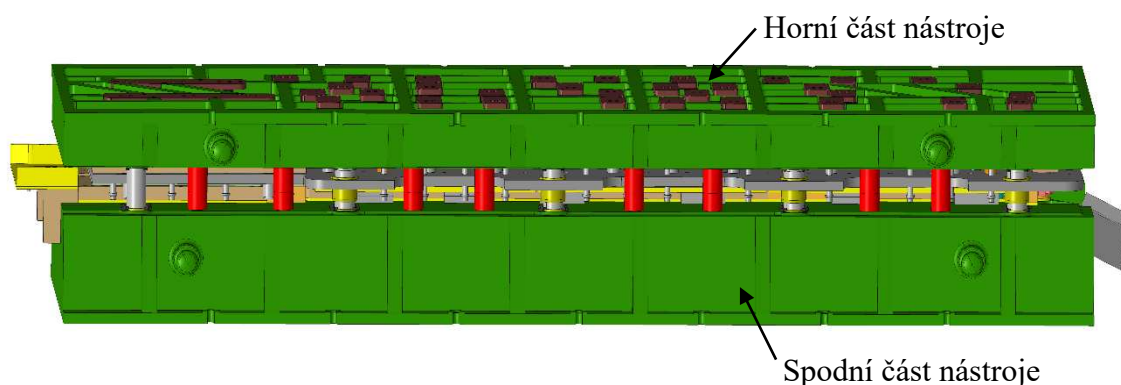
od společnosti ANDRITZ metals, kterým disponuje výrobní závod společnosti Klein automotive ve Štítech. Parametry lisu jsou uvedené v příloze 5. Lis je vybaven automatickým odvíjením ze svitku, rovnačkou a podavačem. V případě poruchy nebo jiných neočekávaných událostí může být nástroj umístěn na silnější lis Kaiser KSTU 10000-50-F51-RKM SE se jmenovitou silou 10 000 kN, jehož specifikace je uvedena v příloze 6.



Obr. 105 Průběh sil během pracovního zdvihu

5.5 Konstrukce nástroje [18]

Pro konstrukci nástroje je důležité vědět, v jakých přesnostech má být součástka vyráběna, jakými a jak velkými silami je nástroj zatěžován, jakou má mít životnost, nejvyšší možnou hmotnost apod. Tento konkrétní nástroj byl konstruován tak, aby byl dostatečně robustní s dostatečnou tuhostí a co nejvíce odolával zatížení od tvářecích procesů. 3D model sestavy nástroje je zobrazen na obrázku 106. Je složen ze dvou hlavních vůči sobě pohyblivých částí –



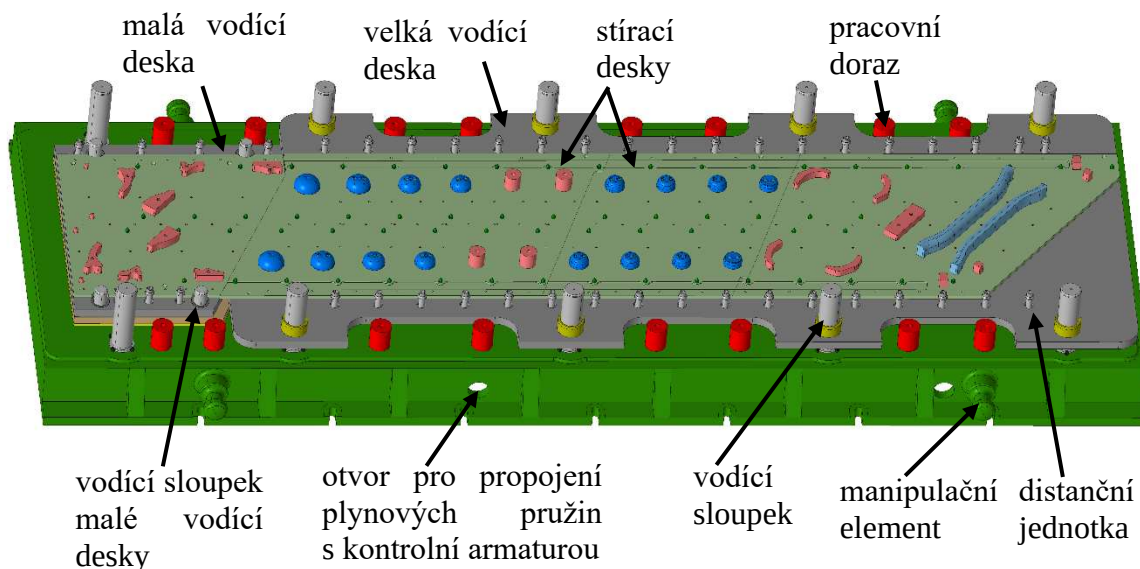
Obr. 106 Model sestavy postupového sduženého nástroje

horní a spodní. Spodní část nástroje se k pracovnímu stolu lisu upíná mechanickými upínkami pomocí drážek, které mají stejnou rozteč jako T drážky na pracovním stole. Horní část nástroje se k beranu lisu upíná pomocí hydraulických upínek. Nástroj je zkonstruován pro posun materiálu zleva doprava. V levé části nástroje jsou ke spodní části přišroubovány podpory pro

snazší zavádění plechu do nástroje. Na pravé straně je umístěn skluz pro hotové výrobky. Sevřená výška nástroje je 779 mm, výška zdvihu je nastavena na hodnotu 150 mm. Výška pracovního zdvihu je 50 mm. Výška, ve které dochází k posunu pásu je 50 mm nad úroveň pracovní roviny, ve které se nachází vrchní plochy všech střížnic. Když horní část nástroje sjíždí z horní úvratě dolů, nejdříve dojde ke kontaktu mezi stíracími deskami a lištami či kolíky pro vedení a nadzvedávání plechu. S dalším pohybem dolů dosedne plech na horní povrch střížnic, odpružená část horního nástroje zůstane stát, přitlačuje plech stíracími deskami ke střížnicím potažmo podpěrným deskám silou vyvozenou plynovými pružinami a prvky ukotvené do horní části nástroje vyjíždí z vodících desek a vykonávají pracovní pohyb – stříhání, tažení nebo lemování. Při dolní úvratě se dostávají do kontaktu horní a dolní pracovní dorazy a mezideskový doraz s vodící deskou. Úloha dorazů je eliminovat průhyb nástroje a zajistit opakovatelně přesnou vzájemnou polohu horní a spodní části ve svislém směru. Po překonání dolní úvratě působí síla od plynových pružin jako stírací a vyhazovací síla. V krátkém časovém úseku, kdy není horní část nástroje v kontaktu s plechem, dojde k posunu pásu o jeden krok a celý cyklus se opakuje.

Horní a dolní základová deska jsou vyrobeny z odlévaných polotovarů ze šedé litiny GG20, aby byla zajištěna co největší tuhost. Žebrování je koncipováno tak, aby byly co nejlépe podepřeny funkční části nástroje – u spodní části střížnice a tažnice a u horní části střížníky a tažníky. Mezi žebry spodní základové desky jsou díry pro odvod materiálů ze střížnic. Volný prostor mezi žebry horního nástroje je využit k umístění plynových pružin přidržovače. Poloha obou částí je vůči sobě zajištěna deseti vodícími sloupky o průměru 80 mm. Ty jsou umístěny tak, aby nemohlo dojít k opačnému nasazení horního nástroje na spodní. Vedení bylo zvoleno jako kluzné, jelikož nástroj se pohybuje maximálně rychlostí 50 zdvihů za minutu a kluzné vedení má větší únosnost než vedení s kuličkovými klecemi. Kluzná pouzdra jsou samomazná s grafitovými tělisky v bronzové matici a jsou přimontována k velké vodící desce i k dolní části nástroje.

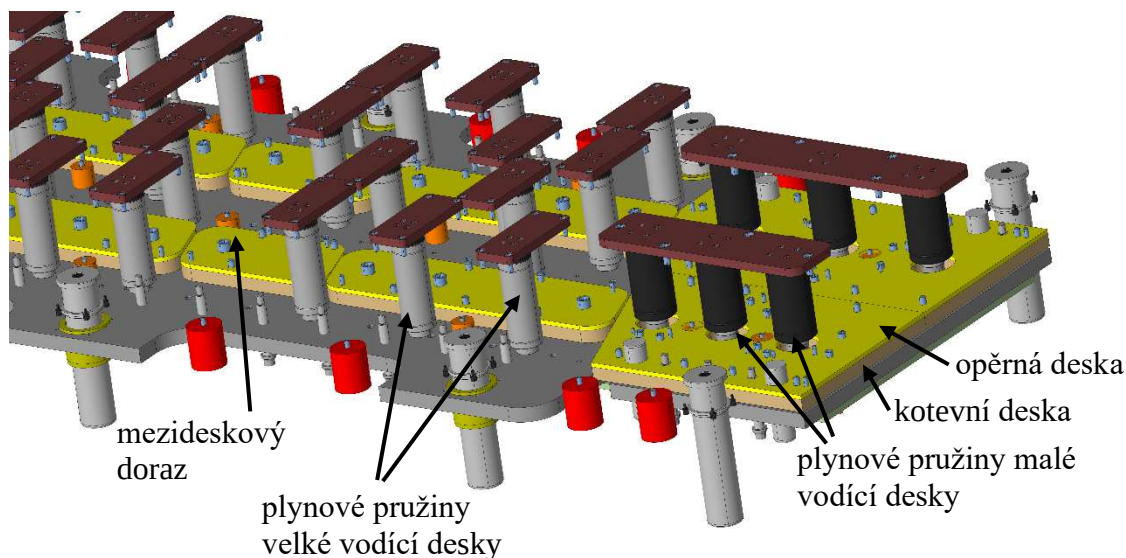
Na obrázku 107 je pohled na horní část nástroje v sevřeném stavu. Vodící desky vyznačené tmavě šedou barvou jsou rozděleny do dvou sekcí. První (menší) překrývá oblast stříhů na



Obr. 107 Horní část nástroje

začátku výrobního postupu, kde dochází k postupnému uvolnění pro první tažnou operaci. A má své vlastní vedení čtyřmi vodícími sloupky o průměru 50 mm se sinterovanými kluznými pouzdry zalisovanými ve vodící desce. Přidržovací a stírací sílu vyvozuje 6 pružin FIBRO 2480.13.03000.063. Spodky pružin jsou opřeny a přišroubovány ke své opěrné desce, která je zase přišroubována k hornímu ránu a při provozu se opěrné desky opírají o beran lisu. Druhá

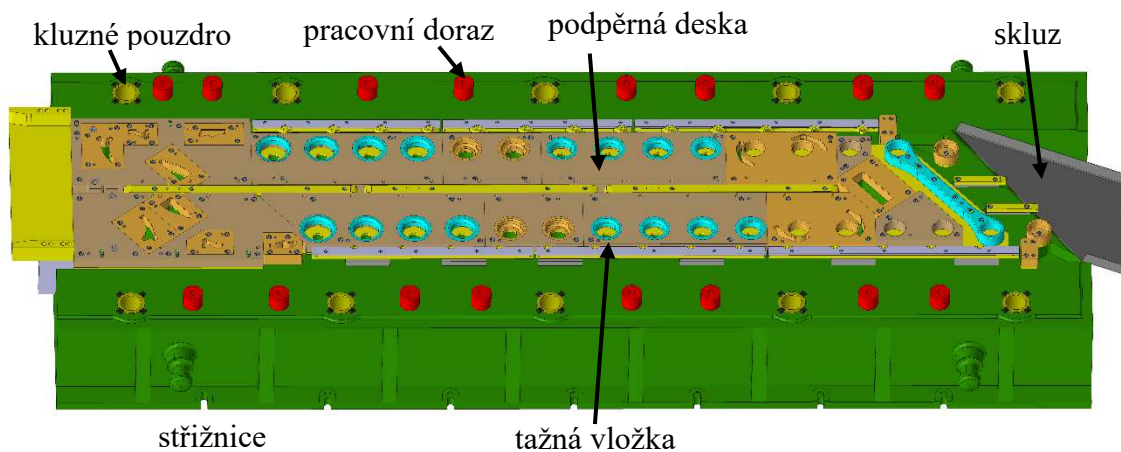
vodící deska (větší) překrývá všechny tvarovací operace a je vedena hlavními vodícími sloupky. Shora je přitlačována 32 kusy plynových pružin FIBRO 2490.14.04700.065, které jsou opřeny stejně jako plynové pružiny malé vodící desky, jak je vidět na obrázku 108 při skrytí horního rámu. Vodící desky mají tloušťku 35 mm a jsou z oceli 11 523. K vodícím deskám jsou zespodu přišroubovány stírací desky tloušťky 15 mm z oceli 19 312. Mezi stírací a kotevní desku jsou osazeny upnuty hledáčky a odlepovače, jenž jsou ovládány šroubovou vinutou pružinou, která je z vrchu opřena o zátku nastavující předpětí pružiny. Ukotvení střížníků a tažníků je provedeno pomocí přišroubování k opěrné desce a přesná poloha je ustavena válcovými kolíky s vnitřním závitem, které prochází z kotevní desky do horního rámu. Kotevní desky jsou vysoké 30 mm a jsou z materiálu 11 523, opěrné desky mají tloušťku 10 mm a jsou z materiálu 19 733. Všechny prvky stříhu, tahu, či lemování jsou opřeny o kalené opěrné desky, aby nebyly



Obr. 108 Opření plynových pružin

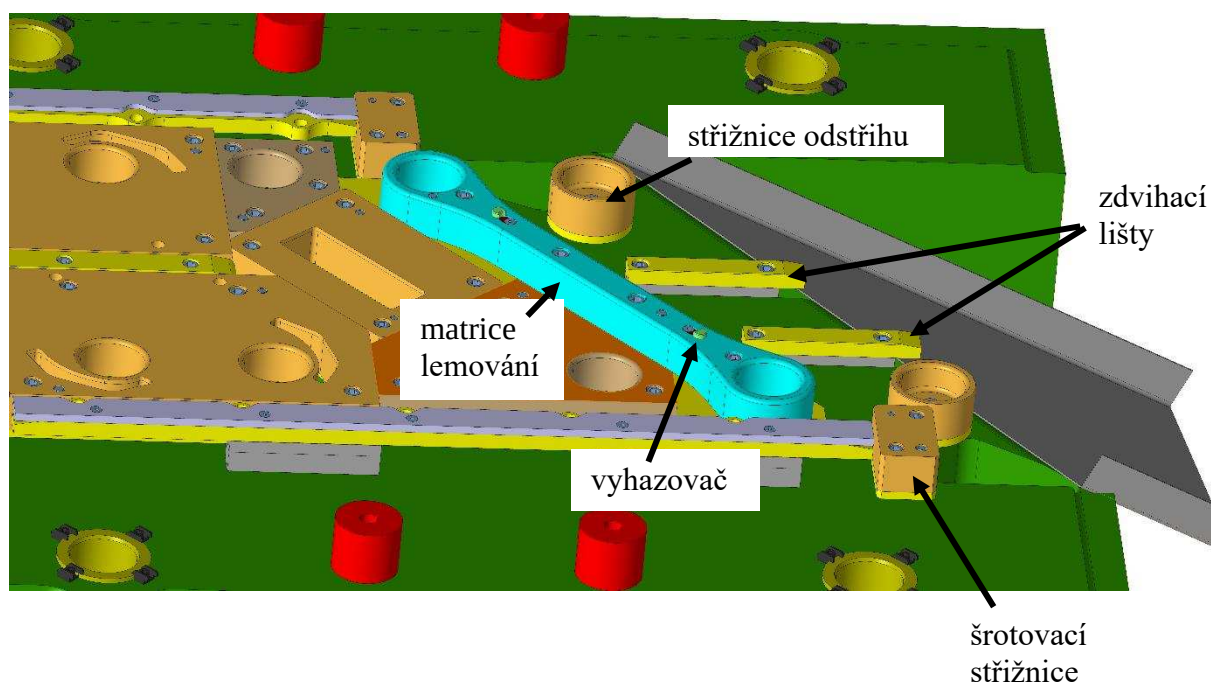
zatlačovány do horního rámu. Tažník pro první tažnou operaci je proveden jako celistvý, protože po jeho sférické části dochází k přesunu materiálu. Od druhé tažné operace jsou tažníky dělené na držák a tvarovou část, která je k držáku připevněna dvojicí šroubů. Od druhé tažné operace nedochází na tvarové části tažníku k výraznému posunu materiálu a nemělo by tak docházet k zatírání o hrany zapuštění šroubů. Materiál v prostoru pod šrouby bude prostrížen po 4 tažné operaci. Držák tažníku je z oceli 11 523 a tvarová část z oceli 19 552.

Na obrázku 109 je zobrazena spodní část nástroje v sevřeném stavu. Vedení pásu zajišťuje v místě vstupu do nástroje pět zdvihacích vodících kolíků, které jsou uloženy do děr s rovným



Obr. 109 Spodní část nástroje

dnem. O dno se opírá šroubová vinutá pružina a nadzvedává kolíky. Zdvih je omezen podložkami. Za střížnými operacemi na začátku výrobního postupu, kde nebyl dostatek prostoru, je pás veden v 6 postranních vodících lištách, které jsou nadzvedávány zdvihacími jednotkami FIBRO 2478.25.00090.063. K lepšímu odlepování plechu od střížnic a spolehlivému nadzvednutí jsou do osy pásu ještě umístěny tři zdvihací lišty. Pro děrování otvorů pro hledáčky je v podpěrné desce uloženo střížné pouzdro. Střížnice prostřihů pro povolení kontury jsou dělány samostatně vždy pro jeden stříh, aby byla snadno vyměnitelná pouze poškozená část. Všechny podpěrné desky i střížnice jsou podloženy kalenými opěrnými deskami z materiálu 19 733. Podpěrné desky jsou z konstrukční oceli 11 523. Výška střížnic je 50 mm a fazetka má výšku 5 mm. Pod ní se otvory zvětšují pod úhlem 2°. Střížnice jsou z materiálu 19 852. Tažné hrany jsou vložkované a zalisované do podpěrných desek, jsou z materiálu 19 573. Na obrázku 110 je vidět řešení vyhazování výlisků z nástroje. Po prostřihnutí středního pásu a následném lemování už by nemuselo dojít k odlepení výlisku z lemovací matrice, jelikož chybí prostřední zdvihací lišta. V lemovací matrici jsou proto umístěny dva válcové vyhazovače, které odlepí materiál od matrice a ke zdvihu olemovaného táhla na výšku posunu pásu dojde díky spojení dílce s postranními pásky plechu pomocí můstků. Po přesunu táhla do poslední operace je poloha výlisku vůči kruhovým střížnicím vymezena zasunutím válcového lemu do díry střížnice. Po odstřížení můstku je již táhlo volné, k nadzvednutí nad střížnice odstříhu dojde díky dvojici zdvihacích lišt mezi kruhovými střížnicemi a pád na skluz způsobí náraz následujícího výlisku při posunu pásu plechu.



Obr. 110 Řešení vypadnutí výrobku z nástroje

6 ZÁVĚRY

V této práci byl vytvořen návrh výrobního postupu výlisku z plechu, který je součástí sestavy vodícího táhla umístěného v nápravě nákladního automobilu. Během provozu je dílec namáhán na tah-tlak a částečně i krut a je vystaven atmosferickým vlivům. V současnosti se táhlo vyrábí z kovaných hlav a silnostěnných trubek. Záměrem R&D týmu společnosti THK je tento design změnit a využít v nové konstrukci symetrických lisovaných součástek. Dílčím cílem práce bylo ověřit vyrobiteľnost navrženého tvaru a případně navrhnout designovou úpravu. Navrženým materiálem je za tepla válcovaná mikrolegovaná ocel S420MC dle normy EN 10149-2 s tloušťkou 4 mm. Plánovaná výrobní série činí 84 tisíc kusů ročně po dobu 7 let.

Kritickým místem dílce je válcový lem pro budoucí oporu pouzdra silentbloků. Pro praktické testování rozšiřování otvoru byl sestrojen speciální přípravek pro zkoušky vzorků s připravenými otvory technologií řezání laserem, jednokrokovým stříháním a dvoukrokovým stříháním. Nejlepších hodnot bylo dosaženo se vzorky vypálenými laserem, u kterých se první trhlinka skrz celou tloušťku plechu vyskytla při poměru rozšíření otvoru $HER=139,5\%$, u vzorků připravených dvoukrokovým stříháním byl maximální $HER=61\%$ a u vzorků s jednoduchým stříháním dosáhl HER maximálně $23,5\%$. Pro výrobu lemu je však zapotřebí HER alespoň 150% . Klasickým způsobem výroby v jedné operaci je válcový lem nevyrobiteľný.

Na testech rozšiřování otvoru byla ověřena přesnost materiálového modelu S420MC prostřednictvím porovnání predikce a experimentálně získaných dat průběhu tvářecích sil a rozložení tloušťky plechu v lemu. Maximální odchylka síly byla $8,84\%$ a největší odchylka tloušťky $4,23\%$.

S využitím vytvořeného a ověřeného materiálového modelu byl v prostředí programu pro plošné tváření PAM-STAMP navržen postup výroby lemu postupným tažením s prostřihem dna. Vyhovujících výsledků bylo dosaženo s osmi operačním postupem výroby válcového lemu a jednou operací pro vytvoření přímých a vydutých lemů na okrajích součástí.

Jako optimální varianta výroby byla vybrána metoda lisování postupovým sdruženým nástrojem. V nástroji je požadovaného tvaru výlisku docíleno dohromady ve dvaceti střížných, tažných a lemovacích operacích. Jako polotovár byl zvolen svitek s využitím materiálu 60% . Maximální zatížení lisu v průběhu pracovního zdvihu je $5\,057\text{ kN}$. Pro výrobu byl zvolen lis Kaiser 8000–50–F5–RKM od ANDRITZ Metals se jmenovitou silou $8\,000\text{ kN}$.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. The TGS Range. In: Man Trucks & Bus Australia [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://man.com.au/tgs-range/>
2. 2005 CHEVROLET SILVERADO 2500 HD Moog R-Series Control Arms RK620054. In: Summit: Racing equipment [online]. [cit. 2020-04-10]. Dostupné z: <https://www.summitracing.com/parts/mog-rk620054/year/2005/make/chevrolet/model/silverado-2500-hd>
3. SKP SRK620616 Suspension Control Arm And Ball Joint Assembly. In: Amazon [online]. 2017-04-12 [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.amazon.com/SKP-SRK620616-Suspension-Control-Assembly/dp/B06Y63ZH9>
4. MRIDE. In: Mack Truck [online]. [cit. 2020-01-18]. Dostupné z: <https://www.macktrucks.com/powertrain-and-suspensions/suspensions/mride/>
5. Firemní materiály THK RHYTHM AUTOMOTIVE CZECH a. s., Strojírenská 160, Dačice.
6. Vysoce pevné mikrolegované oceli: Zpracováno s využitím materiálu ASM International. In: GSI SVL: SVV Praha [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://svv.cz/files/2.11.vysocepevnmikroleg.ocelipdf.pdf>
7. ČSN EN 10149-2: *Ploché výrobky válcované za tepla z ocelí s vyšší mezí kluzu pro tváření za studena - Část 2: Dodací podmínky pro termomechanicky válcované oceli*. Praha: Český normalizační institut, 2014-01-01. 16 s. Třídící znak 421090.
8. Řezání vodním paprskem. Gumex: *Pružné partnerství* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.gumex.cz/sluzby/profily-a-vyroba-tesneni-75/rezani-vodnim-paprskem-46>
9. MRŇA, Libor. Speciální technologie svařování, *Základy laserové techniky* [nepublikovaná přednáška]. Brno. 2019-11-30
10. Princip řezání: Schéma řezání vodním paprskem. In: *BRIKLIS spol. s r.o., středisko WCM: Řezání vodním paprskem a laserem* [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <http://wcm.cz/technologie-rezani-vodnim-paprskem/princip-rezani>
11. Standard configuration for a a PAC torch. In: Desing And Optimization Of Components And Processes For Plasma Sources In Advanced Material Treatments [online]. Esame finale Anno: ALMA MATER STUDIORUM - Università Di Bologna, 2012 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: http://amsdottorato.unibo.it/4625/1/Rotundo_TesiPhD.pdf
12. KOŘÁN, Pavel. Princip laserového řezání. In: Lao: Lasery a optika [online]. 2013 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-rezani-laser-cutting-129>
13. Fine blanking. In: Custompart.net: Sheet Metal Cutting (Shearing) [online]. [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://www.custompartnet.com/wu/sheet-metal-shearing>
14. Ukázkové vývojové projekty z praxe pro posílení praktických znalostí budoucích strojních inženýrů. *Fakulta strojní západočeské univerzity: Katedra Konstruování strojů* [online]. Plzeň, 2012 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: http://www.kks.zcu.cz/projekty-verfin/OPVK_PU/KA_04/
15. Požadavky na lisy a nástroje při výrobě převodovek. *MM: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2017. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/pozadavky-na-lisy-a-nastroje-pri-vyrobe-prevodovek.html>
16. Transferová technologie Digiemme. Kontura Tools [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.konturatools.cz/produkt/transferova-technologie-uspora-materialu>

17. VALENZUELA, Manolo. Progressive Die Design 1. GrabCAD Community [online]. 2017 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://grabcad.com/library/progressive-die-design-1-1>
18. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
19. Technologie II.: Technologie plošného tváření - stříhání. Technická univerzita Liberec: Fakulta strojní [online]. Liberec [cit. 2020-03-17].
20. FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. Vyd. 2. Brno: CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
21. NOVOTNÝ, Josef a Zdeněk LANGER. *Stříhání a další způsoby dělení kovových materiálů*. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1980, 213 s. : il.
22. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 978-80-214-4747-9.
23. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I. Plošné a objemové tváření*. Vyd. 2. Brno: VUT, 1992, 171 s. : il. ; 30 cm. ISBN 80-214-0404-3.
24. SAMEK, Radko, Zdeněk LIDMILA a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část II*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. : obr., čb. fot., grafy, tabulky ; 30 cm. ISBN 978-80-214-4406-5.
25. ŽÁK, Jan, Radko SAMEK a Bohumil BUMBÁLEK. *Speciální letecké technologie I*. 1. vyd. Ediční středisko VUT Brno. Brno: Rektorát Vysokého učení technického v Brně, 1990. 220 s. ISBN 80-214-0128-1.
26. LEU, Daw-kwei, Tsung-chia CHEN a You-min HUANG. Influence of punch shapes on the collar-drawing process of sheet steel. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1999, 88(1-3), 134-146 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1016/S0924-0136(98)00385-9. ISSN 0924-0136.
27. KACEM, Ahmed, Abdelkader KRICHEN a Pierre-Yves MANACH. Characterization of ironing in the hole-flanging process of an aluminum alloy. In: *AIP Conference Proceedings* [online]. American Institute of Physics, 2011, s. 831-838 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1063/1.3623692. ISBN 978-0-7354-0944-6. ISSN 0094-243X.
28. CHANDLER, Ezra. Presentace. Forming: Besides blanking, bending and deep drawing, there are other forming methods in stamping, such as local forming, bulging, flanging, necking, In: SlidePlayer [online] [cit. 2020-03-18] Dostupné z: <https://slideplayer.com/slide/6386486/>
29. BORREGO, Marcos, Domingo MORALES-PALMA, Andrés Jesús MARTÍNEZ-DONAIRE, Gabriel CENTENO a Carpofo VALLELLANO. On the Study of the Single-stage Hole-flanging Process by SPIF. *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2015, 132(C), 290-297 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.497. ISSN 1877-7058.
30. MALHOTRA, Rajiv, Liang XUE, Ted BELYTSCHKO a Jian CAO. Mechanics of fracture in single point incremental forming. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 2012, 212(7), 1573-1590 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.02.021. ISSN 0924-0136.
31. MORALES-PALMA, Domingo, Marcos BORREGO, Andrés J MARTÍNEZ-DONAIRE, Gabriel CENTENO, Carpofo VALLELLANO a Domingo MORALES-PALMA. Optimization of Hole-Flanging by Single Point Incremental Forming in Two Stages. *Materials* (Basel, Switzerland) [online]. 2018, 11(10) [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.3390/ma11102029. ISSN 1996-1944. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2123718479/>

32. BAMBACH, Markus, Holger VOSWINCKEL a Gerhard HIRT. A New Process Design for Performing Hole-flanging Operations by Incremental Sheet Forming. In: *Procedia Engineering* [online]. Elsevier, 2014, s. 2305-2310 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.325. ISSN 1877-7058.
33. LIN, Heng-sheng a Chih-wei TUNG. An investigation of cold extruding hollow flanged parts from sheet metals. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier, 2007, 47(14), 2133-2139 [cit. 2020-03-19]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2007.04.010. ISSN 0890-6955.
34. LAŠTOVICA, Petr. *Vytváření tažených lemů na plechu z vysokopevnostní oceli*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2014.
35. Lodent Precision 10747. In: Jahesh Industrial Group [online]. 2018 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://jaheshindustrialgroup.com/cgi-sys/suspendedpage.cgi>
36. STRÖM, Robert. SSAB: High-strength steel for chassis applications - learn about its mechanical properties and behavior. In: GoToStage [online]. 2017-11-24 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.gotostage.com/channel/55eb3ca125f74678807f1e8555b2249b/recording/15d31118ddd84b098b703bac3c7f5a2d/watch?source=CHANNEL&fbclid=IwAR1k3iCX1k0BAAdgFEX_8HkQS9eI902CgsUgdbi18Ea8a50tjeAmLzWIqRiw
37. BORREGO, Marcos, Domingo MORALES-PALMA, Andrés MARTÍNEZ-DONAIRE, Gabriel CENTENO a Carpóforo VALLELLANO. Analysis of formability in conventional hole flanging of AA7075-O sheets: punch edge radius effect and limitations of the FLC. *International Journal of Material Forming* [online]. Heidelberg: Springer Nature B.V, 2020, 13(2), 303-316 [cit. 2020-03-17]. DOI: 10.1007/s12289-019-01487-2. ISSN 19606206. Dostupné z: <http://search.proquest.com/docview/2370560375/>
38. HANCE, Brandon. Practical Application of the Hole Expansion Test. *SAE International Journal of Engines* [online]. SAE International, 2017, 10(2), 247-257 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.4271/2017-01-0306. ISSN 1946-3936.
39. ČADA, Radek. *Tvářitelnost ocelových plechů*. Ostrava: Repronis, 2001. ISBN 80-86122-77-8.
40. HOSFORD, William a Robert CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge: Cambridge University Press, 2011, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
41. TIŠNOVSKÝ, Miroslav a Luděk MÁDLE. *Hluboké tažení plechu na lisech*. Praha: Nakladatelství technické literatury. 1990. 198 s. ISBN 80-03-00221-4.
42. ČSN EN ISO 6891-1: *Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty*. Praha: Český normalizační institut, 2017-02-01. 76 s. Třídící znak 420310.
43. PAUL, Surajit Kumar. Theoretical analysis of strain-and stress-based forming limit diagrams. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design* [online]. 2013, 48(3), 177-188 [cit. 2019-04-06]. DOI: 10.1177/0309324712468524. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/236156408_Theoretical_analysis_of_strain-and_stress-based_forming_limit_diagrams
44. GORJI BANDPAY, Maysam. *Instability and Fracture Models to Optimize the Metal Forming and Bending Crack Behavior of Al-Alloy Composites*. ETH-Zürich, 2015. DOI: 10.3929/ethz-a-010564530.
45. ČSN EN ISO 12004-2: *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tvářitelnosti - Část 2: Stanovení křivek mezní tvářitelnosti v laboratoři*. Praha: Český normalizační institut, 2009-06-01. 32 s. Třídící znak 420434.

46. Experimentální měření křivky mezních deformací. *MM: Odborně-vzdělávací a zpravodajský portál z oblasti strojírenství a navazujících oborů* [online]. 2015-09-10 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
47. GOM: Optical Measuring Techniques. Application Example: Sheet Metal Forming: Modern measuring tools in stamping applications for complex and simple parts. [online]. 2009-06-05 [cit. 2020-03-12]. Dostupné z: https://www.gom.com/fileadmin/user_upload/industries/stamping_EN.pdf
48. PANICH, Sansot. Bending Limit Curves in Sheet Metal Bending Evaluation. In: Key Engineering Materials [online]. Trans Tech Publications, 2017, s. 180-185 [cit. 2020-03-18]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.751.180. ISBN 9783035710823. ISSN 1013-9826.
49. PAUL, Surajit Kumar. A critical review on hole expansion ratio. *Materialia* [online]. Elsevier, 2020, 9 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1016/j.mtla.2019.100566. ISSN 2589-1529.
50. PAUL, Surajit Kumar. Fundamental aspect of stretch-flangeability of sheet metals [online]. 2018-11-03 [cit. 2020-03-17]. DOI: [10.1177/0954405418815370](https://doi.org/10.1177/0954405418815370).
51. KIM, Jae, Young KWON, Taekyung LEE, Kee-ahn LEE, Hyoung KIM a Chong LEE. Prediction of hole expansion ratio for various steel sheets based on uniaxial tensile properties. *Metals and Materials International* [online]. Seoul: The Korean Institute of Metals and Materials, 2018, 24(1), 187-194 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1007/s12540-017-7288-2. ISSN 1598-9623.
52. ČSN EN ISO 16630: *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška rozšiřováním otvoru*. Praha: Český normalizační institut, 2018-07-01. 76 s. Třídící znak 420438.
53. HANCE, Brandon, Robert COMSTOCK a Daniel SCHERRER. The Influence of Edge Preparation Method on the Hole Expansion Performance of Automotive Sheet Steels. 2013. DOI: 10.4271/2013-01-1167. Dostupné z: <https://saemobilus.sae.org/content/2013-01-1167>.
54. GLÄSNER, Thorsten, Matthias SCHNEIDER, Matthias TROITZSCH a Sebastian WESTHÄUSER. Considering the edge-crack sensitivity of a hot-rolled steel in forming simulation. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2016, s. 012029 [cit. 2020-03-21]. DOI: 10.1088/1757-899X/159/1/012029. ISSN 1757-8981.
55. ALTAN, Taylan a Erman TEKKAYA. Sheet metal forming: processes and applications. Materials Park, Oh: ASM International, 2012. ISBN 1615038442.
56. KIM, Hyunok, Jianhui SHANG, James DYKEMAN, Anoop SAMANT a Clifford HOSCHOUER. Practical Evaluation and Prediction of Edge Cracking in Forming Advanced High Strength Steels (AHSS). 2017. DOI: 10.4271/2017-01-0308. Dostupné z: <https://saemobilus.sae.org/content/2017-01-0308>
57. SHIH, Hua-Chu, Ching-Kuo HSIUNG a Bill WENDT. Optimal Production Trimming Process for AHSS Sheared Edge Stretchability Improvement. 2014. DOI: 10.4271/2014-01-0994. Dostupné z: <https://saemobilus.sae.org/content/2014-01-0994>
58. UTHAISANGSUK, Viton, Ulrich PRAHL a Wolfgang BLECK. Stress based failure criterion for formability characterisation of metastable steels. *Computational Materials Science* [online]. Elsevier B.V, 2007, 39(1), 43-48 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.1016/j.commatsci.2006.01.031. ISSN 0927-0256.
59. STOUGHTON, Thomas a Jeong Whan YOON. Path independent forming limits in strain and stress spaces. *International Journal of Solids and Structures* [online]. Elsevier, 2012, 49(25), 3616-3625 [cit. 2020-04-03]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.08.004. ISSN 0020-7683.

60. HICKEY, Kate. AHSS Edge Stretching Limits. AHSS Insights: Information to educate on the use of Advanced High-Strength Steels [online]. 2018-04-28 [cit. 2020-04-05]. Dostupné z: <https://www.ahssinsights.org/news/ahss-edge-stretching-limits/>
61. STOUGHTON, Thomas a Jeong Whan YOON. Path independent forming limits in strain and stress spaces. International Journal of Solids and Structures [online]. Elsevier, 2012, 49(25), 3616-3625 [cit. 2020-04-06]. DOI: 10.1016/j.ijsolstr.2012.08.004. ISSN 0020-7683.
62. FEISTLE, Martin, Isabella PÄTZOLD, Roland GOLLE, Wolfram VOLK, Andreas FREHN a Ralf ILSKENS. Maximizing the Expansion Ratio through Multi-stage Shear-cutting Process during Collar Forming. In: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, s. 012071 [cit. 2020-04-07]. DOI: 10.1088/1757-899X/418/1/012071. ISSN IOPConferenceSeries:MaterialsScienceandEngineering.
63. ŘIHÁČEK, Jan. *Využití hydroformingu při vytváření strukturovaného povrchu solárního panelu*. Brno, 2017, 109 s. Dizertační práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Libor Mrňa.
64. FIBRO Normálie. *Normálie Katalog 06/2020* [online]. Brno, 2020-06-01 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: https://www.fibro.de/fileadmin/FIBRO/Blaetterkataloge/NormalienGesamtkatalog_Czech/HTML5/8/
65. ODSTRČIL, Radek. Využití laseru při výrobě postupových lisovacích nástrojů. [online]. Ostrava, 2012 [cit. 2020-06-06]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/v04sks/>. Diplomová práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní. Vedoucí práce Vladimír Vrba.
66. UHRÁK, David. Lis 1000 t – specifikace. In: Microsoft Outlook [soukromá korespondence]. [2020-05-27], 14:16. [2020-06-02].

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
A ₅	tažnost měřená na krátké tyči	[%]
A _g	homogenní tažnost	[%]
A _s	střížná práce	[J]
b _a	šířka pásu plechu pro variantu a) z obr. 101	[mm]
b _b	šířka pásu plechu pro variantu b) z obr. 101	[mm]
c _s	koeficient určující způsob stříhání	[mm]
d ₀	počáteční průměr otvoru	[mm]
D _b	průměr dna miskového lemu	[mm]
d _h	střední průměr otvoru po porušení	[mm]
d _{hled}	průměr střížníku pro hledáček	[mm]
d _k	průměr prvku před deformací	[mm]
D _L	vnitřní průměr matrice lemování	[mm]
D _r	průměr fiktivního rondelu pro 1. tažnou operaci	[mm]
dR _x	přírůstek poloměru vytknutého elementu	[mm]
d _{t1}	průměr 1. tažníku	[mm]
d _{t1}	průměr tažníku pro 1. tažnou operaci	[mm]
D _{σ2}	deviátor napětí	[MPa]
dσ _r	přírůstek radiálního napětí	[MPa]
e	eulerovo číslo	[-]
E	Youngův modul pružnosti	[GPa]
F _L	celková lisovací síla	[N]
F _{p1}	síla vyvozená přidržovačem	[N]
F _{p2}	síla vyvozená přidržovačem při lemování	[N]
F _{pcelk}	celková přidržovací síla pro tvářecí operace	[kN]
F _s	velikost střížné síly	[N]
F _{sa}	střížná síla střížníku pro hledáčky	[N]
F _{smax}	maximální velikost střížné síly	[-]
F _{smax1}	maximální střížná síla z prvního celku	[kN]
F _{stir1}	stírací síla	[kN]
F _{zdvih}	zdvihací síla	[kN]
F _{zj}	počáteční síla zdvihací jednotky	[kN]
h	výška lemu	[mm]
HER	poměru rozšíření otvoru	[%]
HER _{min}	minimální hodnota poměru rozšíření otvoru	[%]
h _s	hloubka vniknutí střížné hrany	[mm]
K	materiálová konstanta	[MPa]
k _a	délka kroku pro variantu a) z obr. 101	[mm]
k _b	délka kroku pro variantu b) z obr. 101	[mm]
k _L	koeficient lemování	[-]
k _p	faktor navýšení tlaku při stlačení zdvihací jednotky o 50 mm	[-]
L	délka křivky stříhu	[mm]

Označení	Legenda	Jednotka
l_1	rozměr hlavní osy elipsy	[mm]
l_2	rozměr vedlejší osy elipsy	[mm]
l_n	délka ohnutého úseku	[mm]
m	exponent pro ocel u podmínky plasticity Vegter lite	[-]
m_1	součinitel tažení pro 1. tažnou operaci	[-]
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
n_s	koeficient vlivu vnějších podmínek při stříhání	[-]
p_p	měrný tlak přidržovače	[MPa]
P_{to}	počet tažných operací	[-]
Q	síla od přidržovače při lemování vytlačováním	[N]
$(R_L)_s$	střední poloměr válcového lemu	[mm]
$\bar{R}$	vážený průměr koeficientu normálové anizotropie	[-]
R	koeficient normálové anizotropie plechů	[-]
r	obecný poloměr	[-]
R_0	koeficient normálové anizotropie ve směru válcování (0°)	[-]
r_0	počáteční poloměr otvoru	[-]
R_b	koeficient Barlatovy podmínky plasticity	[-]
R_e	mez kluzu v tahu	[MPa]
R_{eH}	horní mez kluzu v tahu	[MPa]
R_{eL}	dolní mez kluzu v tahu	[MPa]
r_f	konečná hodnota poloměru otvoru miskového lemu	[mm]
R_f	poloměr vydutého lemu	[mm]
R_i	poloměr přístřihu pro výrobu vydutého lemu	[mm]
R_L	poloměr vrtání lisovnice	[mm]
r_L	poloměr zaoblení hrany lisovníku	[mm]
R_m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
r_m	poloměr zaoblení hrany lisovnice	[MPa]
R_{min}	minimální hodnota koeficientu normálové anizotropie	[-]
R_p	poloměr přístřihu pro 1. tažnou operaci v oblasti lemované díry	[mm]
R_t	smluvní tahové napětí	[MPa]
R_x	obecný poloměr vytknutého elementu	[mm]
S_p	plocha kontaktu přidržovače s výtažkem	[mm ²]
S_{pola}	plocha polotovaru jednoho kroku varianty a) z obr. 101	[mm ²]
S_{polb}	plocha polotovaru jednoho kroku varianty b) z obr. 101	[mm ²]
$S_{př}$	plocha poloviny přístřihu	[mm ²]
t_0	tloušťka plechu	[mm]
t_1	tloušťka vzorku po zatížení při tahové zkoušce	[mm]
t_{min}	tloušťka na hraně otvoru	[mm]
v_s	střížná vůle	[mm]
w_0	šířka vzorku před tahovou zkouškou	[mm]
w_1	šířka vzorku po tahové zkoušce	[mm]
w_{ps}, w_{sh}	váhový faktor podmínky plasticity Vegter lite	[-]
Z_{abs}	šířka „prstýnku“	[mm]
Z_{rel}	poměrná šířka „prstýnku“	[%]

Označení	Legenda	Jednotka
z_s	střížná mezera	[mm]
α	index označující směr odběru vzorku vůči směru válcování	[°]
α_0	úhel opásání lisovníku	[rad]
$\varepsilon, \varepsilon_1, \varepsilon_l, \varepsilon_r, \varepsilon_\theta, \varepsilon_w$	poměrná deformace	[-]
ε'_θ	obvodová deformace	[-]
$\bar{\varepsilon}_p$	efektivní přetvoření	[-]
η_a	využití plechu varianty a) z obr. 101	[%]
η_b	využití plechu varianty b) z obr. 101	[%]
λ	součinitel plnosti diagramu F_s-h_v	[-]
μ	součinitel smykového tření	[-]
ξ	lodeho součinitel pro rovinný stav přetvoření	[-]
σ	smluvní napětí	[MPa]
$\sigma_{1,2}$	složky hlavního normálového napětí	[MPa]
σ_b	koeficient Barlatovy podmínky plasticity	[-]
σ_k	mez kluzu	[MPa]
σ_n	normálová složka napětí	[MPa]
σ_p	přirozený přetvárný odpor materiálu	[MPa]
σ_r	složka napětí v radiálním směru	[MPa]
σ_θ	složka napětí v obvodovém směru	[MPa]
$\bar{\sigma}$	skutečné napětí	[MPa]
$\tilde{\sigma}_o$	příspěvek radiálního napětí od ohybu	[MPa]
$\tilde{\sigma}_r$	radiální napětí	[MPa]
$\sigma_{ReH\alpha}$	koeficient plošné anizotropie pro horní mez kluzu	[-]
$(\sigma_k)_s$	střední hodnota napětí při lemování	[MPa]
$(\sigma'_k)_v$	hodnota přirozeného přetvár. odporu pro max. roztažení otvoru	[MPa]
$(\tilde{\sigma}_r)_K$	komplexní radiální napětí	[MPa]
τ_s	mez pevnosti ve stříhu	[MPa]
φ	logaritmická deformace	[-]
φ_0	posunutí křivky zpevnění	[-]
φ_1	hlavní logaritmické přetvoření	[-]
φ_2	vedlejší logaritmické přetvoření	[-]
φ_3	přetvoření ve směru tloušťky plechu	[-]
φ_r	logaritmické přetvoření v radiálním směru při lemování otvoru	[-]
φ_t	logaritmické přetvoření ve směru tloušťky plechu	[-]
φ_w	logaritmické přetvoření ve směru šířky vzorku při tah. zkoušce	[-]
φ_θ	obvodové logaritmické přetvoření při lemování otvoru	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad technologií výroby předního horního ramene osobního automobilu [1], [2]	9
Obr. 2 Umístění vodícího táhla v nákladním automobilu [3], [4], [5]	10
Obr. 3 Koncept nového designu vodícího táhla [5]	11
Obr. 4 Subkomponent vodícího táhla [5]	11
Obr. 5 Princip řezání vodním paprskem [10]	12
Obr. 6 Schéma řezání svazkem plazmatu [11]	12
Obr. 7 Schéma řezání laserem [12]	13
Obr. 8 Schéma stříhání [13]	13
Obr. 9 Spodní část transferového nástroje [14]	13
Obr. 10 Sdružený postupový nástroj [17]	14
Obr. 11 Schéma fází stříhu [13]	14
Obr. 12 Vzhled střižné plochy při normální střižné vůli [18]	15
Obr. 13 Uzavřené stříhání [20]	15
Obr. 14 Vliv střižné vůle na průběh trhlin [20]	15
Obr. 15 Stav napjatosti a přetvoření při běžném uzavřeném stříhání [20]	16
Obr. 16 Průběh střižné síly [20]	17
Obr. 17 Příklady dílců s lemy [24]	18
Obr. 18 Příklady tvarů lemu [24]	18
Obr. 19 Uspořádání nástrojů [24]	19
Obr. 20 Lemování otvoru [24]	19
Obr. 21 Napětí a deformace na hraně otvoru [24]	20
Obr. 22 Závislost k_L na t_0/d_0 se zohledněním kvality plochy otvoru [24]	21
Obr. 23 Vliv spodního přidržovače na hodnotu k_L [24]	22
Obr. 24 Lemování otvoru s využitím spodního přidržovače [24]	22
Obr. 25 Průběhy sil pro různá zakončení lisovníků [24]	23
Obr. 26 Sdružený nástroj [24]	23
Obr. 27 Tvary tažníků pro lemování se ztenčením stěny [27], [28]	24
Obr. 28 Lemování se ztenčením stěny [27]	24
Obr. 29 Jednobodové inkrementální lemování [29]	25
Obr. 30 "Noodle theory" [30]	25
Obr. 31 Strategie vytvoření lemu [31]	26
Obr. 32 Vznik trhliny při jednobodovém inkrementálním lemování [31]	26
Obr. 33 Modifikace strategie jednobodového lemování otvoru [31]	26
Obr. 34 Porovnání výsledků jednokrokové a dvukrokové strategie [31]	27
Obr. 35 Deformace dosažitelné metodou SPIF [32]	27
Obr. 36 Rychloběžné nástroje pro SPIF [32]	27
Obr. 37 Schéma metody lemování vytlačováním [32]	28
Obr. 38 Výroba lemů z průtaží [33]	28
Obr. 39 Postup při výrobě lemu tažením [34]	29
Obr. 40 Příklad výrobku [35]	29
Obr. 41 Geometrie přímého lemu [25]	29
Obr. 42 Geometrie vypuklého lemu [25]	30
Obr. 43 Geometrie vydutého lemu [25]	30

Obr. 44 Využití lemování za účelem zvýšení únosnosti nebo životnosti dílu [36]	30
Obr. 45 Příklady defektů lemů [29], [37], [38]	31
Obr. 46 Smluvní diagram tahové zkoušky [42].....	32
Obr. 47 Keeler-Goodwinův diagram mezní tvářitelnosti [43]	32
Obr. 48 Příklady deformační sítě [39]	33
Obr. 49 Deformace sítě [39]	34
Obr. 50 Upravené vzorky pro tahovou zkoušku [39]	34
Obr. 51 Zkouška dle Nakajimy [45]	34
Obr. 52 Porovnání různých metod pro získání FLC [44]	35
Obr. 53 Deformační síť a barevná mapa přetvoření B sloupku osobního vozu vytvořená pomocí systému ARGUS [47]	35
Obr. 54 Obráz zatíženého vzorku v GOM Correlate [47]	35
Obr. 55 GOM Aramis [47]	35
Obr. 56 Rozdílná příčina vzniku trhliny [44]	36
Obr. 57 Porovnání FLC a BLC [48]	36
Obr. 58 Srovnání vzorků a deformací pro HET a tahovou zkoušku [51].....	37
Obr. 59 Schéma zkušební metody rozšíření otvoru dle ČSN ISO 16630 [52].....	38
Obr. 60 Srovnání HER oceli DP 980 [53]	38
Obr. 61 Porovnání HER a FLC [49]	39
Obr. 62 Metoda HSDT [57].....	40
Obr. 63 FLD nezávislý na deformační historii [58]	41
Obr. 64 Konstrukce PEPS diagramu [59].....	42
Obr. 65 Porovnání HER různých materiálů [60]	42
Obr. 66 Schéma výrobního postupu lemu otvoru s pomocí dvou krokového stříhání [61]	43
Obr. 67 Porovnání parametrů druhého stříhu a dosažených hodnot HER [61].....	43
Obr. 68 Mechanismus oddělování materiálu při dvou krokovém stříhání [61].....	43
Obr. 69 Koncept plechového výlisku vodícího táhla [5]	44
Obr. 70 Odběr vzorků pro tahovou zkoušku [63].....	45
Obr. 71 Diagram napětí deformace S420MC	45
Obr. 72 Shoda podmínky plasticity Vegter Lite s experimentem	47
Obr. 73 Podmínky plasticity a experimentální data	48
Obr. 74 Porovnání FLC jednotlivých materiálů	48
Obr. 75 Geometrie vzorku	49
Obr. 76 Přípravek pro testování HER.....	49
Obr. 77 Umístění přípravku na stroji.....	50
Obr. 78 Vzorky připravené laserem po testu	50
Obr. 79 Detail průchozí trhliny	51
Obr. 80 Pozdě zastavený test.....	51
Obr. 81 Porovnání HER stříhaných otvorů	51
Obr. 82 Porovnání jedno a dvou krokového stříhání.....	52
Obr. 83 Střížná plocha vzorků.....	52
Obr. 84 Měření tvrdosti v blízkosti střížné hrany.....	52
Obr. 85 FLD diagram	53
Obr. 86 Síť prvků.....	53
Obr. 87 Porovnání průběhu sil.....	54

Obr. 88 Porovnání tloušťky plechu	54
Obr. 89 Úprava designu – vlevo starý, vpravo nový	55
Obr. 90 Rozvin součásti	55
Obr. 91 Tvar přístřihu vodičího táhla	55
Obr. 92 Schéma rozměrů nástrojů pro výrobu lemovaného otvoru	56
Obr. 93 Sít' prvků připravená pro výpočet	57
Obr. 94 Výsledky simulace po prvním tahu horního vlákna (strana přilehlá k tažníku).....	57
Obr. 95 Srovnání tvaru táhla před ostřihem a po ostřihu.....	58
Obr. 96 Výsledky simulace po kalibraci lemu horní vlákna (strana přilehlá k přidržovači)	58
Obr. 97 Finální tvar výlisku po numerické simulaci	58
Obr. 98 Výška lemů výlisku.....	59
Obr. 99 Rozložení tloušťky plechu.....	59
Obr. 100 Průběh tvářecích sil z numerické simulace	59
Obr. 101 Varianty rozmístění přístřihů	60
Obr. 102 Základní krok posuvu pásu plechu	61
Obr. 103 schéma rozmístění nástrojů	61
Obr. 104 Označení tažníků	62
Obr. 105 Průběh sil během pracovního zdvihu	64
Obr. 106 Model sestavy postupového sdruženého nástroje	64
Obr. 107 Horní část nástroje.....	65
Obr. 108 Opření plynových pružin.....	66
Obr. 109 Spodní část nástroje.....	66
Obr. 110 Řešení vypadnutí výrobku z nástroje	67

SEZNAM TABULEK

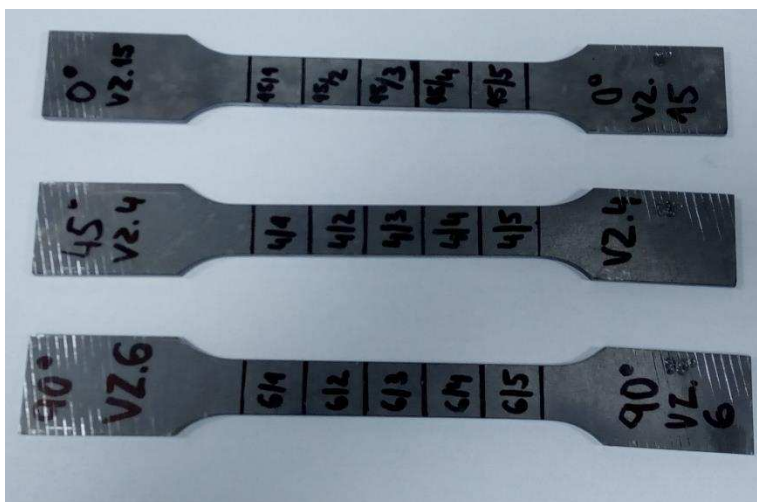
Tab. 1 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti S420MC. [7].....	11
Tab. 2 Vstupní hodnoty pro model zakoupeného materiálu.....	46
Tab. 3 Shoda experimentálních dat s podmínkami plasticity	47
Tab. 4 Rozměry děr vzorků	49
Tab. 5 Výsledky rozšíření otvorů zhotovených laserem	50
Tab. 6 Výsledky rozšíření otvorů zhotovených laserem	51
Tab. 7 Střížné síly	62
Tab. 8 Skupiny střížníků.....	62

SEZNAM PŘÍLOH

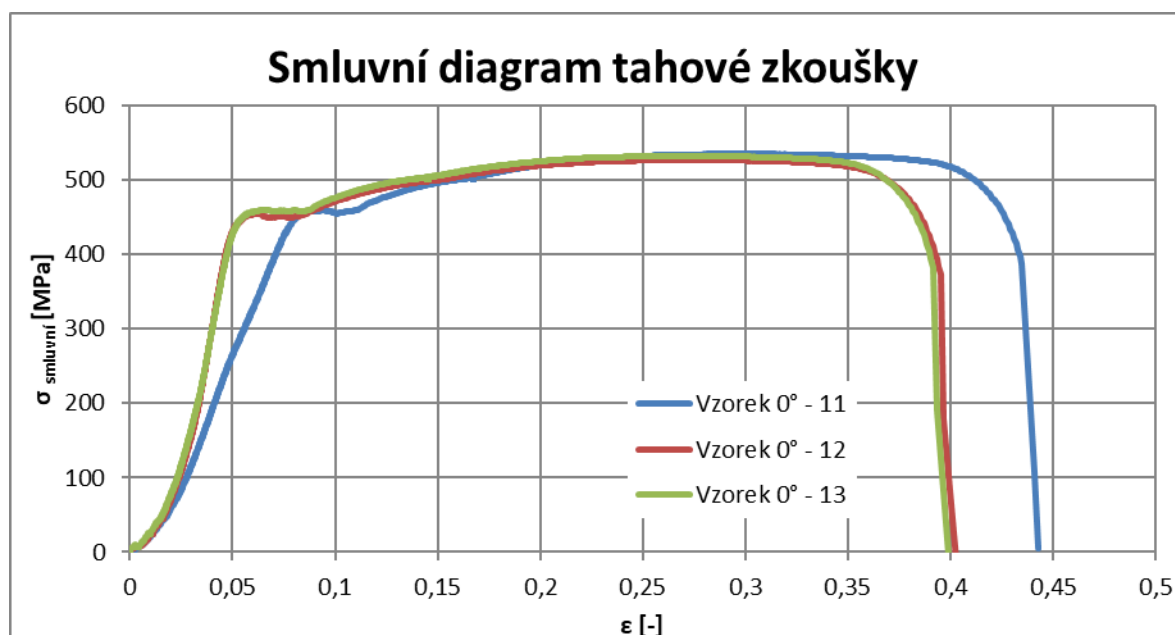
Příloha 1	Výsledky tahových zkoušek a vyhodnocení normálové anizotropie
Příloha 2	Výsledky testu rozšiřování otvoru připraveného řezáním laserovým paprskem
Příloha 3	Výsledky testu rozšiřování otvoru připraveného stříháním
Příloha 4	Výsledky numerické simulace
Příloha 5	Specifikace lisu Kaiser 8000 – 50 – F5 – RKM [65]
Příloha 6	Specifikace lisu Kaiser 10.000 – KSTU 10000-50-F51-RKM SE

SEZNAM VÝKRESŮ

Sestava postupového nástroje	DP-170393-2020-00
Spodní část postupového nástroje	DP-170393-2020-02.00



Vzorky po měření anizotropie



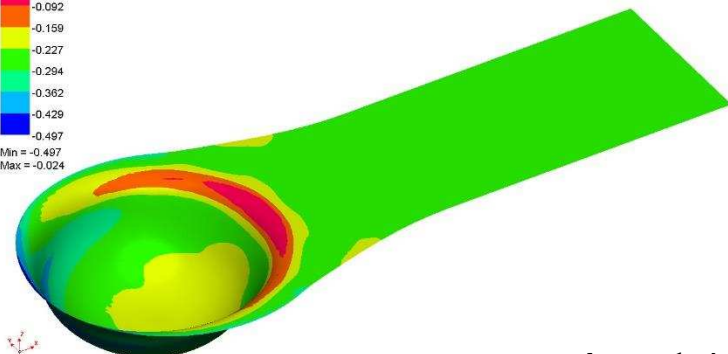
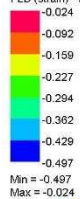
0°								
	vz. 13				vz. 14			
	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]
1	4,002	3,828	19,926	19,495	4,078	3,917	19,923	19,493
2	4	3,829	19,925	19,515	4,078	3,915	19,925	19,514
3	4,001	3,829	19,926	19,515	4,08	3,921	19,923	19,517
4	4,002	3,83	19,927	19,499	4,079	3,916	19,923	19,491
5	4,001	3,828	19,925	19,499	4,079	3,914	19,923	19,469
prům.	4,0012	3,8288	19,9258	19,5046	4,0788	4,0788	19,9234	19,4968
45°								
	vz. 1				vz. 3			
	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]
1	4,065	3,952	19,854	19,294	4,066	3,95	19,846	19,284
2	4,065	3,941	19,86	19,288	4,006	3,951	19,855	19,261
3	4,066	3,974	19,855	19,313	4,007	3,945	19,855	19,267
4	4,065	3,927	19,849	19,271	4,066	3,935	19,856	19,27
5	4,064	3,93	19,854	19,236	4,066	3,932	19,855	19,258
prům.	4,065	3,9448	19,8544	19,2804	4,0422	3,9426	19,8534	19,268
90°								
	vz. 6				vz. 7			
	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]	Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]
1	4,05	3,93	19,885	19,44	4,07	3,911	19,885	19,367
2	4,07	3,917	19,887	19,436	4,05	3,907	19,885	19,376
3	4,05	3,916	19,882	19,446	4,09	3,908	19,887	19,358
4	4,06	3,907	19,885	19,392	4,06	3,891	19,885	19,331
5	4,07	3,92	19,89	19,384	4,06	3,898	19,886	19,341
prům.	4,06	3,918	19,8858	19,4196	4,066	3,903	19,8856	19,3546
					φ_b	φ_s	r_0	
vz. 15					0,021401	0,028884	0,740926	
Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]					
4,003	3,831	19,999	19,574					
4,001	3,83	19,995	19,596					
4,001	3,831	19,998	19,585					
4,003	3,834	20	19,575					
4,004	3,828	20	19,565					
4,0024	3,8308	19,9984	19,579					
					φ_b	φ_s	r_{45}	
vz. 4					0,028845	0,028516	1,011535	
Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]					
4,066	3,951	19,832	19,332					
4,066	3,943	19,854	19,368					
4,064	3,969	19,855	19,335					
4,065	3,925	19,855	19,299					
4,064	3,925	19,854	19,246					
4,065	3,9426	19,85	19,316					
					φ_b	φ_s	r_{90}	
vz. 8					0,025075	0,037995	0,659947	
Tloušťka s0 [mm]	Tloušťka s [mm]	Šířka b0 [mm]	Šířka b [mm]					
4,071	3,926	19,826	19,334					
4,077	3,93	19,828	19,351					
4,074	3,925	19,827	19,36					
4,072	3,917	19,821	19,341			R_0	0,740926	
4,07	3,917	19,826	19,349			R_{45}	1,011535	
4,0728	3,923	19,8256	19,347			R_{90}	0,659947	

LASER sada děr	číslo vzorku	průměr před HET [mm]	průměr po HET [mm]				průměr měření [mm]	HER [%]	průměr HER [%]	HER _{min} [%]	HER _{max} [%]	rozptyl	ETL [%]	ETL [mm]
			1. měření	2. měření	3. měření	4. měření								
48	L_48_1	48,13	69,68	69,66	69,67	69,62	69,66	44,73						
	L_48_2	48,13	69,68	69,68	69,69	69,68	69,68	44,78	44,80	44,73	44,88	0,00	19,96521	3,26542
	L_48_3	48,10	69,68	69,70	69,69	69,68	69,69	44,88						
44	L_44_1	44,10	69,60	69,66	69,64	69,66	69,64	57,91						
	L_44_2	44,05	69,55	69,64	69,61	69,62	69,61	58,01	57,97	57,91	58,01	0,00	24,06081	3,098319
	L_44_3	44,07	69,61	69,64	69,62	69,63	69,63	57,99						
40	L_40_1	40,08	69,41	69,54	69,55	69,54	69,51	73,43	73,38	73,32	73,43	0,00	28,20312	2,929313
	L_40_2	40,11	69,49	69,52	69,52	69,55	69,52	73,32						
	L_40_3	40,10	69,49	69,53	69,55	69,54	69,53	73,39						
36	L_36_1	36,08	69,34	69,48	69,52	69,51	69,46	92,52						
	L_36_2	36,10	69,42	69,47	69,49	69,51	69,47	92,44	92,46	92,42	92,52	0,00	32,58535	2,750518
	L_36_3	36,10	69,45	69,45	69,49	69,47	69,47	92,42						
32	L_32_1	32,08	69,40	69,44	69,45	69,47	69,44	116,46	116,35	116,25	116,46	0,01	37,16366	2,563723
	L_32_2	32,12	69,41	69,49	69,45	69,49	69,46	116,25						
	L_32_3	32,11	69,49	69,41	69,49	69,48	69,47	116,34						
28	L_28_1	28,11	64,87	65,09	65,27	65,12	65,09	131,55	139,46	131,55	144,09	31,61	39,69792	2,460325
	L_28_2	28,12	68,42	68,62	68,78	68,73	68,64	144,09						
	L_28_3	28,08	68,00	68,05	68,30	68,30	68,16	142,74						

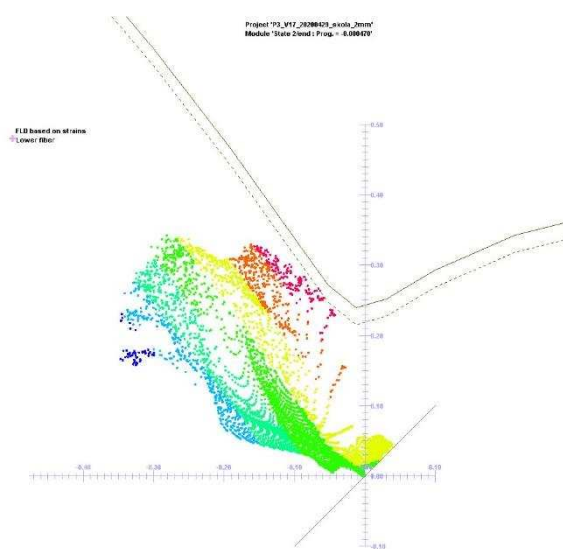
STŘÍH sada děr	1. díra [mm]	2. díra [mm]	střížná vůle [%]	číslo vzorku	průměr před HET [mm]	průměr po HET [mm]				měření [mm]	HER [%]	průměr HER [%]	HER _{min} [%]	HER _{max} [%]	rozptyl	ETL [%]	Tloušťka [mm]
						1. měření	2. měření	3. měření	4. měření								
50	50	-	0,8	S_50_1	49,77	65,81	65,71	65,65	65,70	65,72	32,04	23,5	16,38	32,04	41,93	8,34904	3,739359
				S_50_2	49,85	61,10	60,05	61,09	61,10	60,84	22,04						
				S_50_3	49,86	57,98	58,05	58,04	58,04	58,03	16,38						
45/5	45	-	0,7	S_45_1	44,81	55,79	55,87	55,81	55,84	55,83	24,59	22,5	16,74	26,19	17,05	8,510817	3,732759
				S_45_2	44,82	52,32	52,30	52,33	52,34	52,32	16,74						
				S_45_3	44,80	56,50	56,56	56,53	56,54	56,53	26,19						
45/4	42	45	0,7	2S_45_1	44,92	69,59	69,58	69,64	69,64	69,61	54,97	55,0	54,97	55,10	0,00	22,25681	3,171922
				2S_45_2	44,92	69,65	69,60	69,64	69,63	69,63	55,01						
				2S_45_3	44,91	69,66	69,65	69,65	69,66	69,66	55,10						
42	42	-	0,9	S_42_1	41,96	46,05	46,05	46,05	46,10	46,06	9,78	18,3	9,78	33,66	119,09	5,219886	3,867029
				S_42_2	41,97	46,68	46,73	46,74	46,73	46,72	11,32						
				S_42_3	41,98	56,05	56,07	56,17	56,15	56,11	33,66						
31	28,2	31	1,6	2S_31_1	30,69	47,76	47,68	47,81	47,85	47,78	55,67	61,0	55,67	66,39	28,73	22,45781	3,163721
				2S_31_2	30,69	50,99	50,99	51,15	51,13	51,07	66,39						
				2S_31_3	VZORKY VYHRAZENÉ PRO MĚŘENÍ STŘÍHEM OVLIVNĚNÉ ZÓNY												
28,2	28,2	-	1,4	S_28_1	28,04	35,68	35,84	35,76	35,79	35,77	27,56	23,2	18,76	27,56	19,36	9,408307	3,696141
				S_28_2		33,30	33,30	33,33	33,32	33,30	18,76						
				S_28_3		33,30	33,25	33,33	33,32	33,30	18,76						

Project "13_V17_20200428_4x106_2mm"
Module "State 2 (end) : Prog. = 8.000407"

FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)

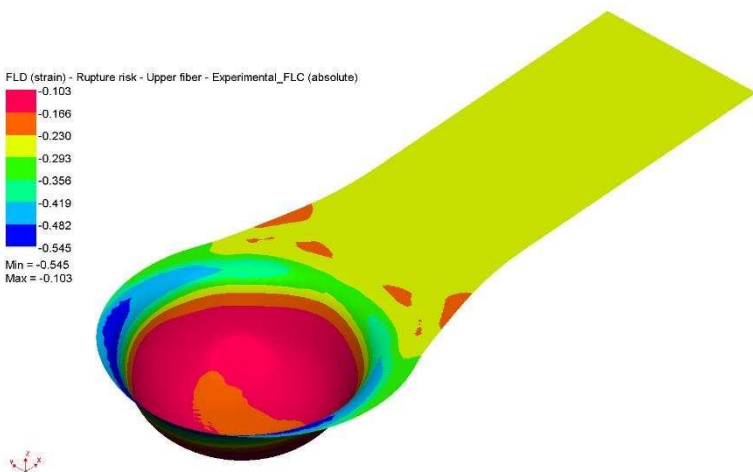
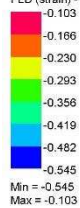


1. tah – vrchní strana

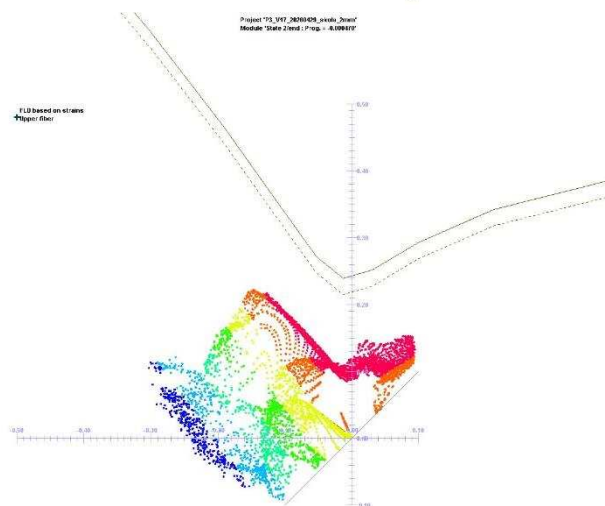


Project "13_V17_20200428_4x106_2mm"
Module "State 2 (end) : Prog. = 8.000407"

FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)

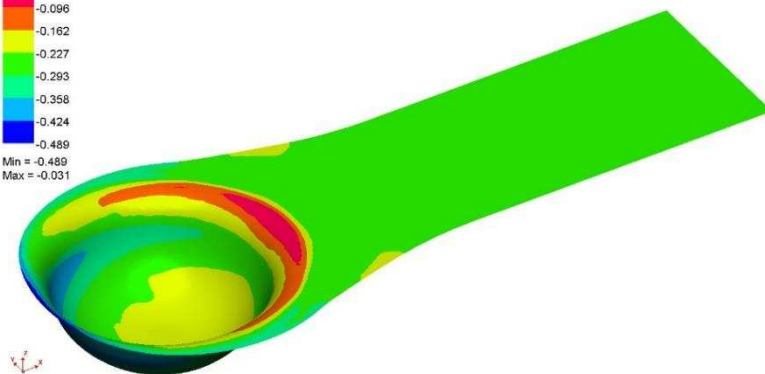
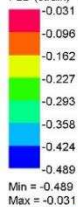


1. tah – spodní strana

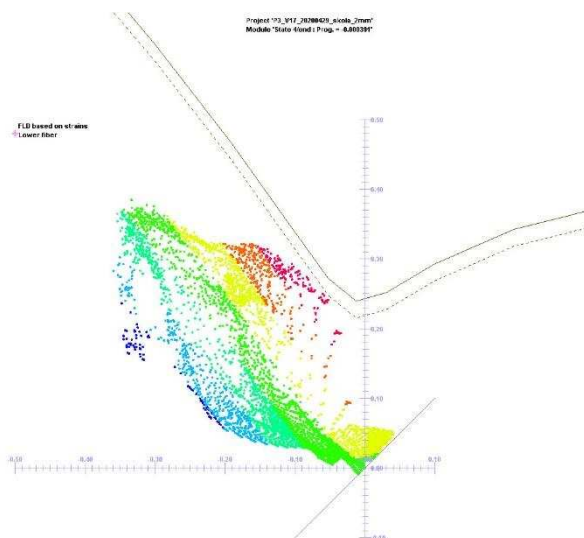


Project "13_V17_20200428_4x106_2mm"
Module "State 2 (end) : Prog. = 8.000391"

FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)

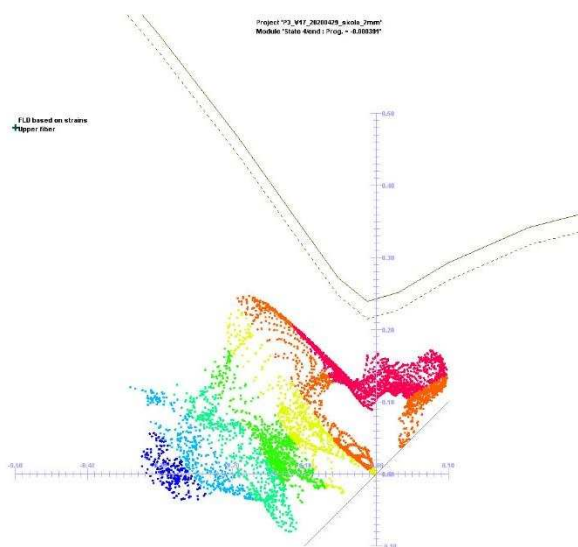
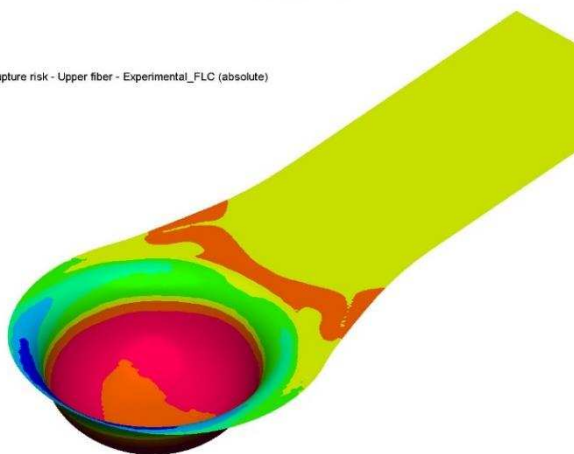
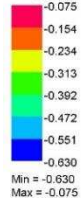


2. tah – vrchní strana



Project "13_112_26200429_sivola_2mm"
Module "State Element: Prop." - 4.1003917

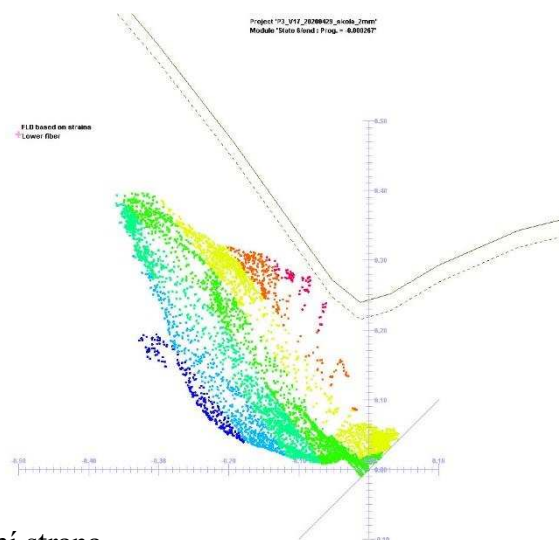
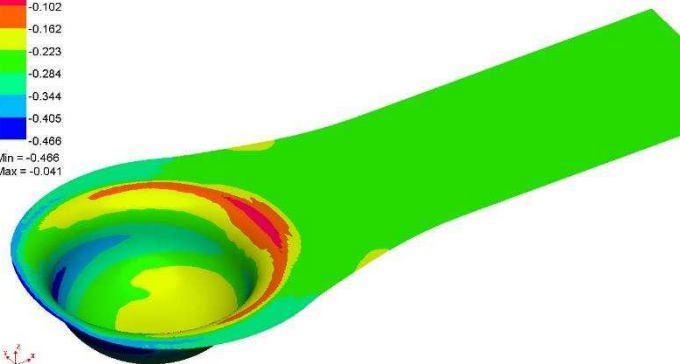
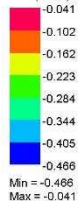
FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



2. tah – spodní strana

Project "13_112_26200429_sivola_2mm"
Module "State Element: Prop." - 4.1003917

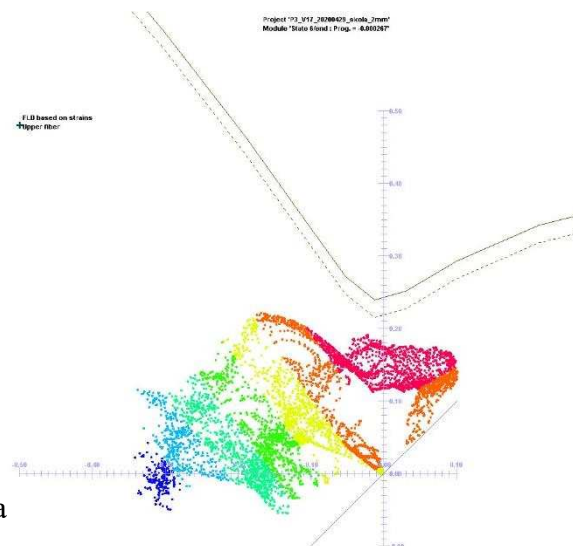
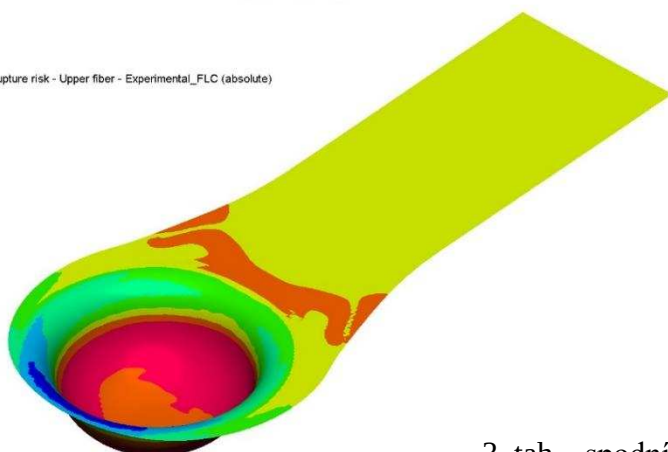
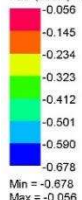
FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



3. tah – vrchní strana

Project "13_112_26200429_sivola_2mm"
Module "State Element: Prop." - 4.1003917

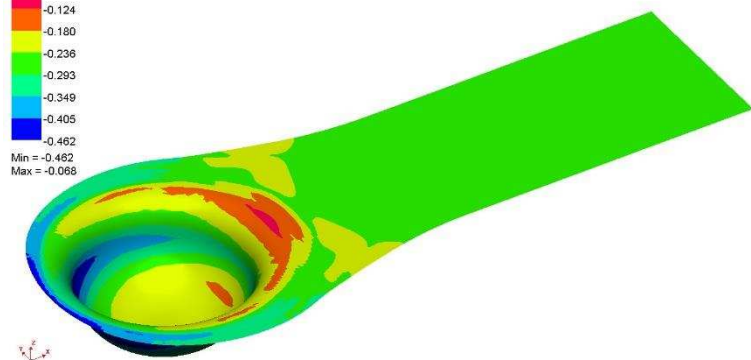
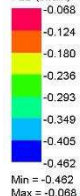
FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



3. tah – spodní strana

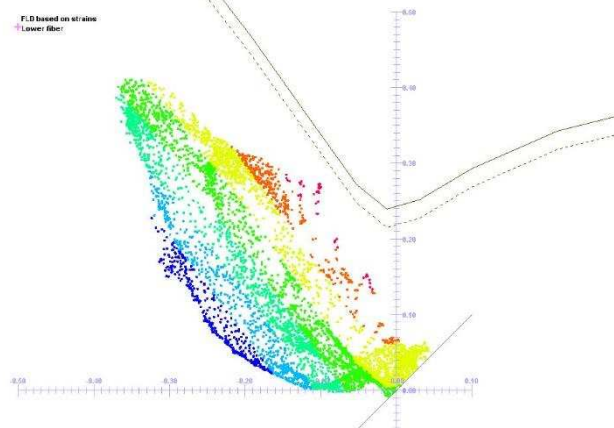
Project "V17_20200429_ukola_2mm"
Module "State Element" Prog. - 0.000000

FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



Project "V17_20200429_ukola_2mm"
Module "State Element" Prog. - 0.000000

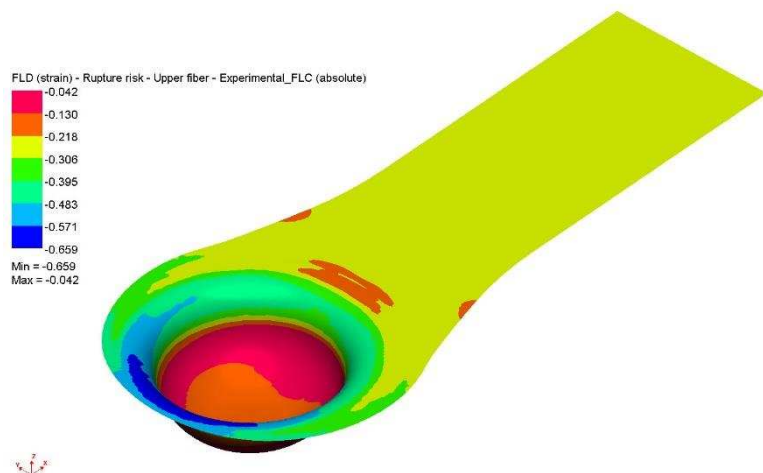
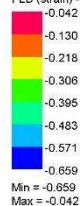
FLD based on strains
Lower fiber



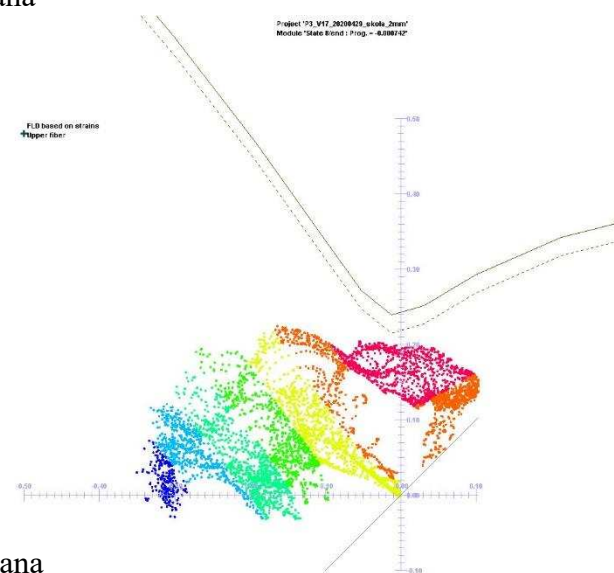
4. tah – vrchní strana

Project "V17_20200429_ukola_2mm"
Module "State Element" Prog. - 0.000000

FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



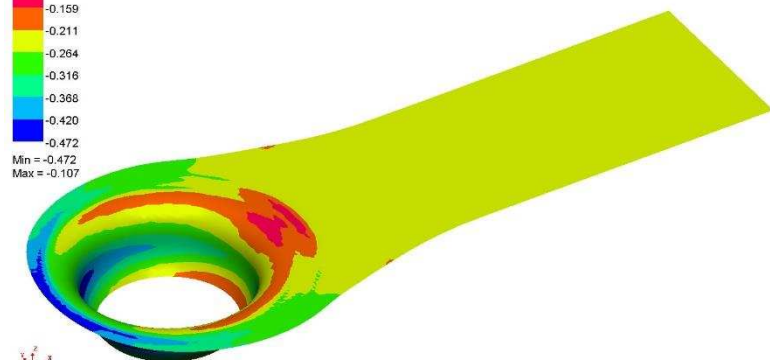
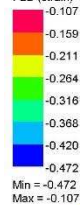
FLD based on strains
Upper fiber



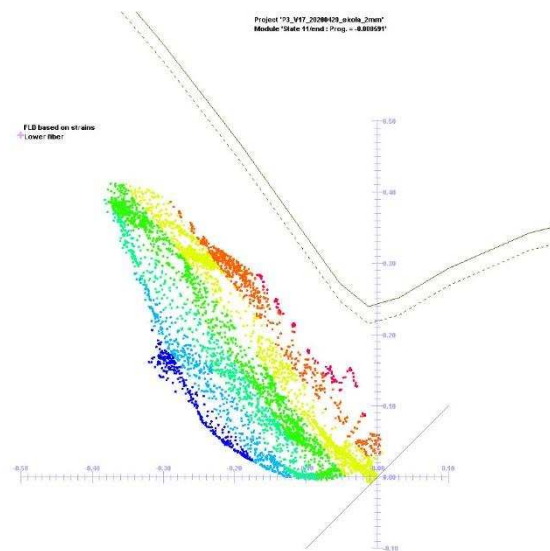
4. tah – spodní strana

Project "V17_20200429_ukola_2mm"
Module "State Element" Prog. - 0.000000

FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



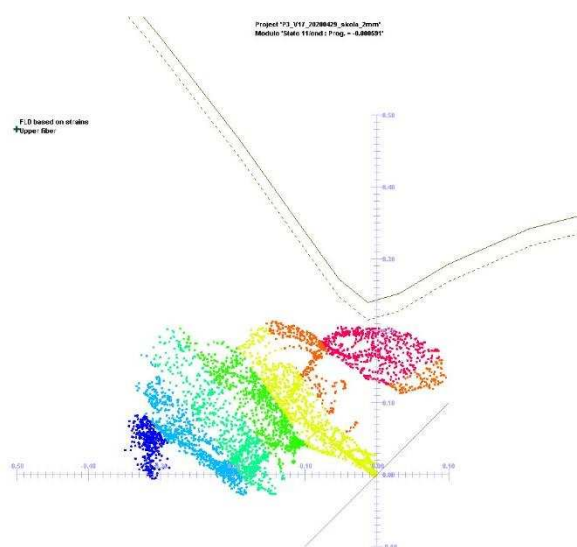
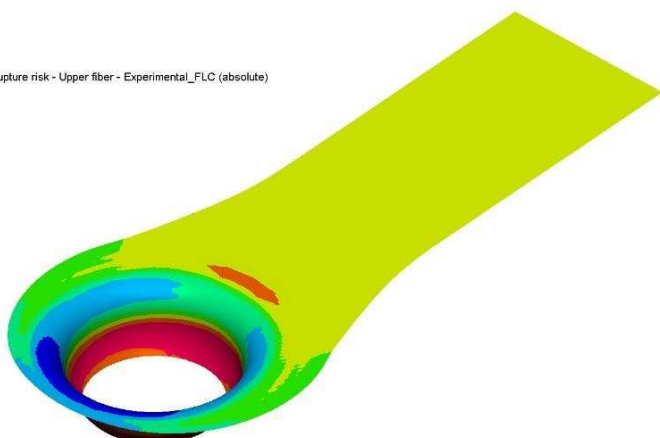
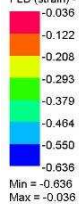
FLD based on strains
Lower fiber



5. tah – vrchní strana

Project "13_V17_20200429_sivola_2mm"
Module "State 13 (end) : Prog. = 0.000001"

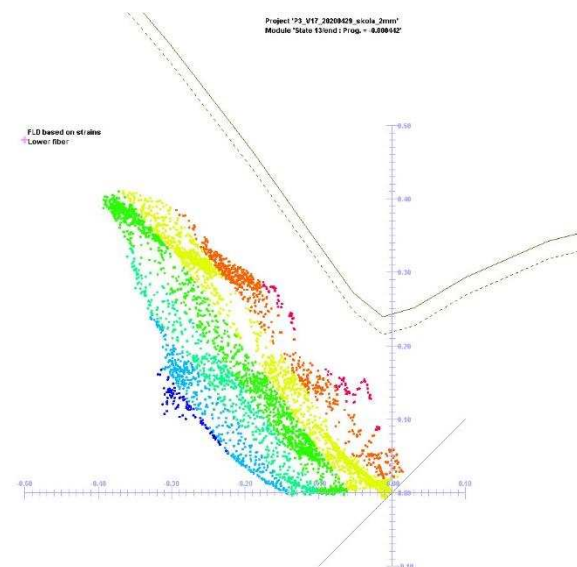
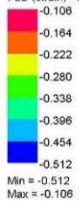
FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



5. tah – spodní strana

Project "13_V17_20200429_sivola_2mm"
Module "State 13 (end) : Prog. = 0.000001"

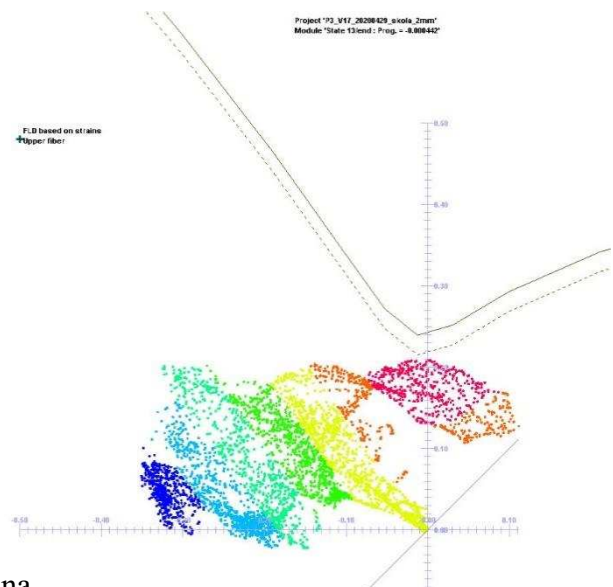
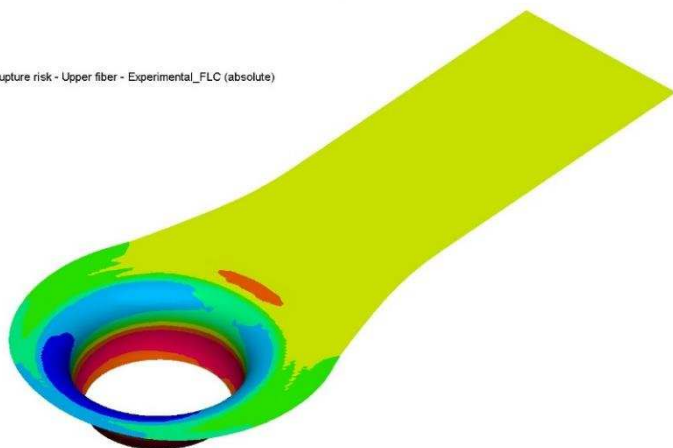
FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



6. tah – vrchní strana

Project "13_V17_20200429_sivola_2mm"
Module "State 13 (end) : Prog. = 0.000001"

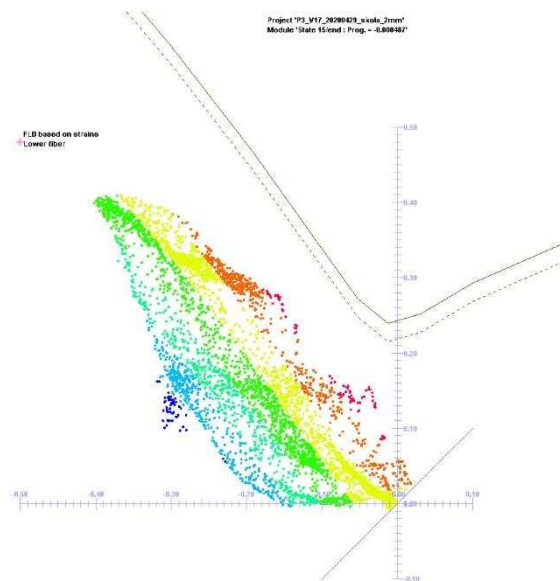
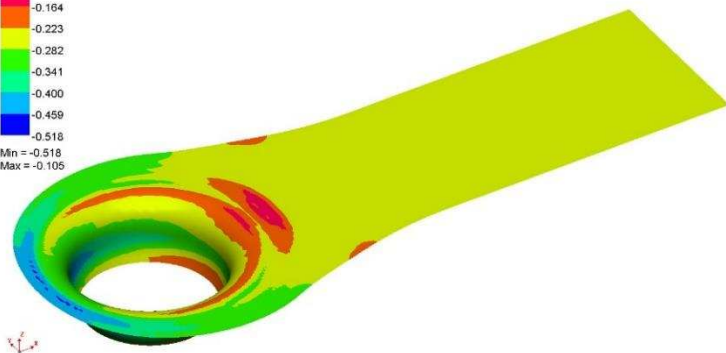
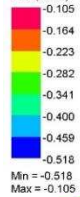
FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



6. tah – spodní strana

Project "13_V17_20200429_aktualizace_2mm"
Module "State 15 Load" : Pr nap. = 0.000000

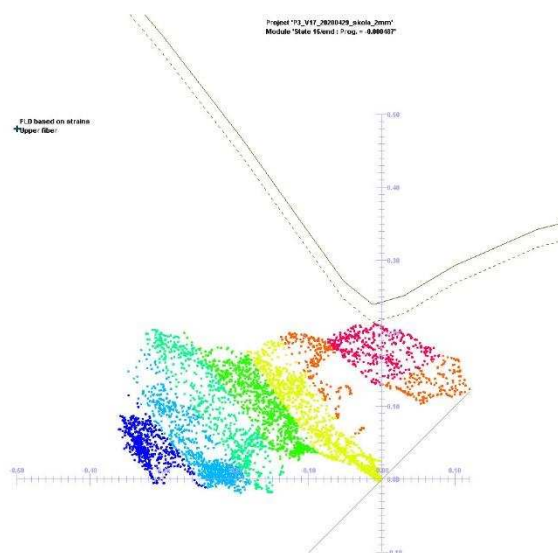
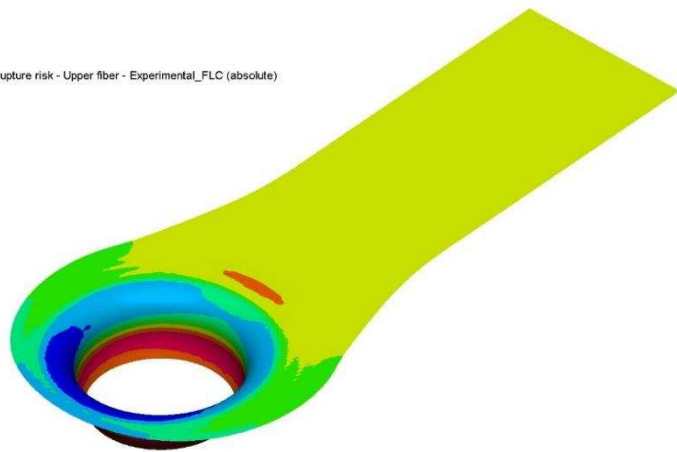
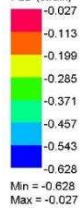
FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



7. tah – vrchní strana

Project "13_V17_20200429_aktualizace_2mm"
Module "State 15 Load" : Pr nap. = 0.000000

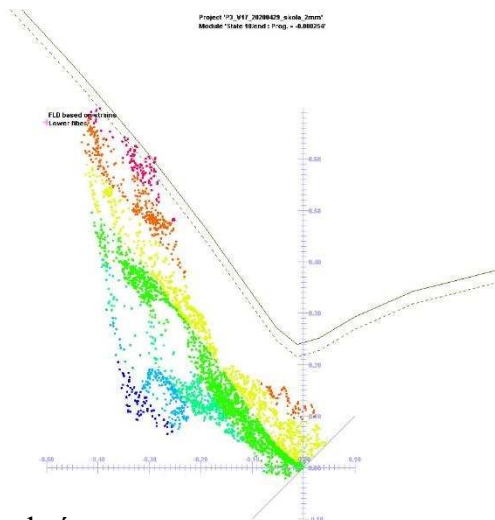
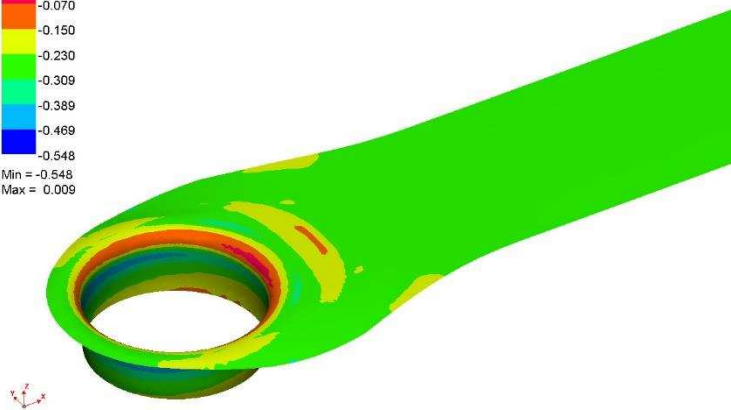
FLD (strain) - Rupture risk - Upper fiber - Experimental_FLC (absolute)



7. tah – spodní strana

Project "13_V17_20200429_skola_2mm"
Module "State 10 (end) : Prop. = 0.000254"

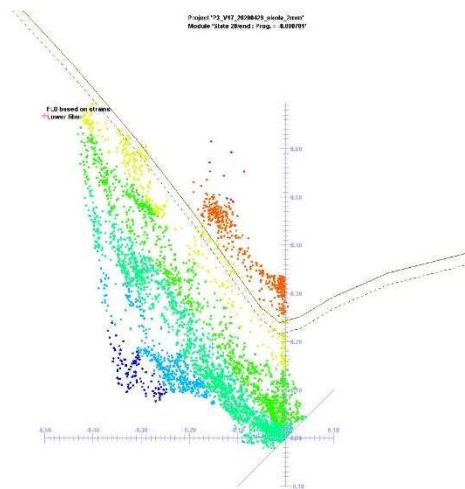
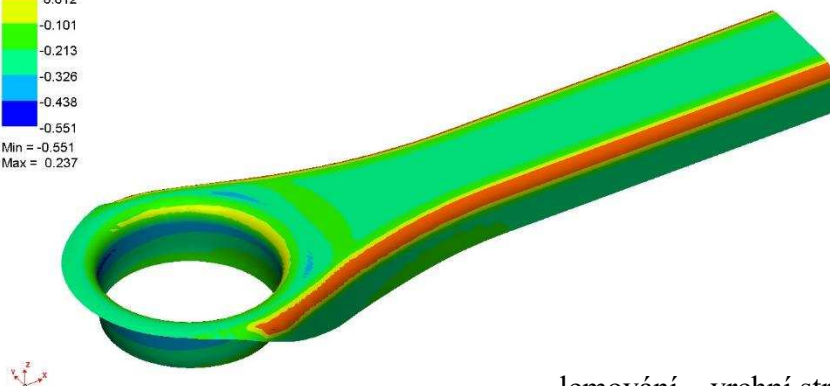
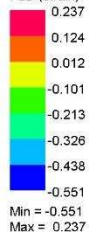
FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



kalibrační tah – vrchní strana

Project "13_V17_20200429_skola_2mm"
Module "State 20 (end) : Prop. = 0.000101"

FLD (strain) - Rupture risk - Lower fiber - Experimental_FLC (absolute)



lemování – vrchní strana

		PŘÍLOHA C SPECIFIKACE LISU		Revize: 1
				Datum: 26.8.2013
Typ lisu	Press type	Kaiser 8000 – 50 – F5 – RKM		
Interní číslo lisu	Internal press number	K8		
Druh pohonu lisu	Drive systém	Servo pohon		
Používané nástroje	Type of used tools	Postupové / Transferové		
Jmenovitá síla	Nominal force	8000	kN	
Směr toku materiálu	Material flow	L → R pás / L → R platina		
Maximální počet zdvihů	Maximum SPM	50	1/min	
Minimální počet zdvihů	Minimum SPM	1	1/min	
Maximální sevřená výška (viz. graf)	Maximal shut height	1100	mm	
Minimální sevřená výška (viz. graf)	Minimal shut height	700	mm	
Přestavení beranu	Slide adjustment	250	mm	
Výška zdvihu maximální	Maximum slide stroke	400	mm	
Výška zdvihu minimální	Minimum slide stroke	100	mm	
Zastavitelná výška nástroje (nej. zdvih; přestavení beranu max.)		950	mm	
Šířka průchodu pro materiál		1910	mm	
Počet vstupů pro kontrolu nástroje		8	ks	
Počet výstupů snímače vačky		16	ks	
Systém výměny stolu (stolové desky)		T-track		
Stůl lisu	Bolster specification			
Rozměry stolu	Bolster dimension	5000 x 2000	mm	
Upínací drážky stolu	T-slots in bolster	T28 H8 DIN650		
Beran lisu	Ram specification			
Rozměry beranu	Ram dimension	5000 x 2000	mm	
Upínací drážky beranu	T-slots in ram	T28 H8 DIN650		
Manipulace s nástrojem	Tool manipulation			
Manipulační prostředek	Tool is manipulated by	jeřáb		
Maximální nosnost	Max. tool weight	20000	kg	
Upínání nástrojů				
Tloušťka spodní upínací desky	Lower die clamp height	80	mm	
Tloušťka horní upínací desky	Upper die clamp height	80	mm	
Středění nástroje	Tool locating (centering)	stůl / středící čepy		
Průměr středících čepů	Diameter of locating pins	40 – 60	mm	
Odvod odpadu		Scrap system		
Rozměry propadu ve stolu	Scrap hole in bolster	4200 x 500	mm	
Odpadové šachty vedle stolu	Scrap holes in floor	N/A	mm	

		SPECIFIKACE LISU Klein – automotive		Revize: 4
				Datum: 29.5.2019
Typ lisu	Press type	Kaiser 10.000 – KSTU 10000-50-F51-RKM SE		
Interní číslo lisu	Internal press number	K9		
Druh pohonu lisu	Drive system	Servo pohon		
Používané nástroje	Type of used tools	Postupové / Transferové		
Imenovitá síla	Nominal force	10.000	kN	
Směr toku materiálu	Material flow	R → L pás		
Maximální počet zdvihů	Maximum SPM	40	1/min	
Minimální počet zdvihů	Minimum SPM	1	1/min	
Maximální sevřená výška nástroje při : - maximálním zdvihu beranu beranu v dolní úvratí nastavení beranu nahore	Maximal shut height	* 950	mm	
Minimální sevřená výška	Minimal shut height	700	mm	
Přestavení beranu	Slide adjustment	250	mm	
Výška zdvihu – neměnitelná	Maximum slide stroke	500	mm	
Šířka průchoodu pro materiál		1910	mm	
Počet vstupů pro kontrolu nástroje		8 + 1	ks	
* Druh připojení snímačů pro kontrolu nástroje		válcový konektor 7 PIN / Harting 10 PIN	ks	
Počet výstupů snímače vačky		16	ks	
Systém výměny stolu (stolové desky)		T-track		
Stůl lisu	Bolster specification			
Rozměry stolu	Bolster dimension	5000 x 2000	mm	
Upínací drážky stolu	T-slots in bolster	T28 H8 DIN650		
* Maximální dovolené zatížení stolu lisu		25 000	kg	
* Vzdálenost stolu od spodní hrany transferové lišty		400	mm	
Beran lisu	Ram specification			
Rozměry beranu	Ram dimension	5000 x 2000	mm	
Upínací drážky beranu	T-slots in ram	T28 H8 DIN650		
Maximální dovolené zatížení beranu		10 000	kg	
Manipulace s nástrojem	Tool manipulation			
Manipulační prostředek	Tool is manipulated by	jeřáb		
Maximální nosnost	Max. tool weight	20 000	kg	
Upínání nástrojů				
Tloušťka spodní upínací desky	Lower die clamp height	80	mm	
Tloušťka horní upínací desky	Upper die clamp height	80	mm	
Středění nástroje	Tool locating (centering)	stůl / středící čepy		
Průměr středících čepů	Diameter of locating pins	40 – 60	mm	

Odvod odpadu	Scrap system		
Rozměry propadu ve stolu	Scrap hole in bolster	4200 x 600	mm
Odpadové šachty vedle stolu	Scrap holes in floor	* 4 100 x 350	mm
Transfer			
Délka pojezdu	Osa X	0 – 1000	mm
Délka pojezdu	Osa Y	0 – 600	mm
Délka pojezdu	Osa Z	* 0 – 250	mm
Vzdálenost transf. lišt ve stavu otevřeno		1600	mm
Nosnost transferu		200	kg
Odvíječka	Decoiler		
Maximální šířka svitku	Maximum coil width	1500	mm
Minimální šířka svitku	Minimum coil width	100	mm
Minimální vnitřní průměr svitku	Minimum inner coil diameter	460	mm
Maximální vnitřní průměr svitku	Maximum inner coil diameter	620	mm
* Maximální vnější průměr svitku	Maximum coil diameter	2000	mm
Maximální hmotnost svitku	Maximum coil weight	15000	kg
Minimální tloušťka plechu	Minimum blank thickness	0.8	mm
Maximální tloušťka plechu	Maximum blank thickness	6	mm
Průřez materiálu pro pevnost 500 N/mm ²		2900	mm ²
Podavač	Coil feeder		
Min. výška podávání (od stolu)	Min. feeding height	400	mm
Max. výška podávání (od stolu)	Max. feeding height	700 (650 transfer nástroje)	mm
Minimální tloušťka plechu	Minimum blank thickness	0.8	mm
Maximální tloušťka plechu	Maximum blank thickness	6	mm
Maximální šířka svitku	Maximum coil width	1500	mm
Minimální šířka svitku	Minimum coil width	100	mm
Průřez materiálu (při pevnosti 500 Mpa)		2900	N/mm ²
Přesnost podání		±0,1	mm
Manipulátor přístřihů	Manipulator of blanks		
* NE			