



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VÝROBY DÍLCE METODOU ELASTOFORMING

ANALYSIS OF MANUFACTURING OF COMPONENT BY ELASTOFORMING TECHNOLOGY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Lorenc

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Eva Peterková, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Bc. Tomáš Lorenc**
Studijní program: Strojírenská technologie
Studijní obor: Strojírenská technologie
Vedoucí práce: **Ing. Eva Peterková, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

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:

Analýza výroby dílce metodou elastoforming

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o analýzu výroby plechového dílce používaného v leteckém průmyslu. Pro výrobu je použita metoda elastoforming, kde tvářecím nástrojem je kovový lisovník a polyuretanová lisovnice. V rámci analýzy bude například porovnána metoda elastoformingu a hydroformingu, zkoumán vliv tepelného zpracování na tvářecí proces či vliv procesních a geometrických parametrů na zpevnění materiálu.

Cíle diplomové práce:

Provedení aktuální literární studie se zaměřením na technologii tváření nepevným nástrojem s primárním zaměřením na elastomery.

Návrh technologie a postupu výroby součásti.

Provedení potřebných technologických a kontrolních výpočtů.

Návrh tvářecího přípravku.

Provedení analýzy výroby dílce (např. porovnání užívaných procesů výroby pomocí nepevného nástroje, analýza vlivu tepelného zpracování na proces výroby, analýza vybraných procesních a geometrických parametrů na zpevňování a tvářitelnost dílce).

Zpracování získaných výsledků a vyvození odpovídajících závěrů.

Seznam doporučené literatury:

TSCHATTSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN 35-403-3216-2.

HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. Metal forming: mechanics and metallurgy. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.

Handbuch der Umformtechnik: processes - machines - tools. New York: Springer, c1996. ISBN 35-406-1099-5.

SUCHÝ, Ivana. Handbook of die design: processes - machines - tools. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6271-6.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření: processes - machines - tools. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 4., V Akademickém nakladatelství CERM 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. ISBN 978-80-214-3425-7.

SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření: Část I. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4220-7.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

Ing. Jan Zouhar, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

V diplomové práci, zpracované v rámci magisterského studia, je rozbor a návrhy úpravy výroby náběžného žebra letounu L-410. Součást je vyráběna z hliníkové slitiny D16. Přesněji se jedná o plech tloušťky 0,8 mm, který je po vyfrézování základního polotovaru tvářen nepevným nástrojem metodou Guerin. Po provedení analýzy celého výrobního procesu a určení kritického místa, díky provedeným sériím zkoušek, byly vyhodnoceny možné varianty inovace výroby. Navrženými změnami a jejich optimalizací může dojít ke snížení pracnosti odstraněním některých prozatím nutných přípravných a dokončovacích ručních operací. Zároveň se zvýší opakovatelnost a zefektivní současná výroba dílce.

Klíčová slova

plech, tváření, materiál, lis, nepevný nástroj

ABSTRACT

In this thesis, processed within the master's degree is the analysis and proposals for modification of production stagnation ribs aircraft L-410. The part is made of aluminum alloy D16. More specifically, it is a 0.8 mm thickness sheet, which after the milling of the blank molded in the basic non-rigid tool by Guerin. After analyzing the entire manufacturing process and the determination of the critical points due to a series of tests carried out were evaluated possible variants production innovation. Proposed changes and their optimization can reduce the labor intensity deleting some time being necessary preparatory and finishing operations manual. It also increases the repeatability and streamline current production panels.

Key words

sheet, forming, materiál, press, non-rigid tool

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

LORENC, Tomáš. *Analýza výroby dílce metodou elastoforming*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/139734>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Eva Peterková

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Analýza výroby dílce metodou elastoforming vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

místo, datum

Tomáš Lorenc

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto paní Ing. Evě Peterkové, Ph.D za vstřícnost, cenné připomínky a rady, které mi poskytla při vypracování diplomové práce.

Dále mé poděkování patří týmu pracovníků Aircraft Industries a.s. a zaměstnancům VUT FSI ÚST, kteří se podíleli na zhotovení zkušebních dílců, trhacích vzorků a provedení potřebných zkoušek a měření pro praktickou část práce.

Na závěr bych chtěl vyjádřit vděčnost za stálou podporu své rodině a přátelům.

OBSAH

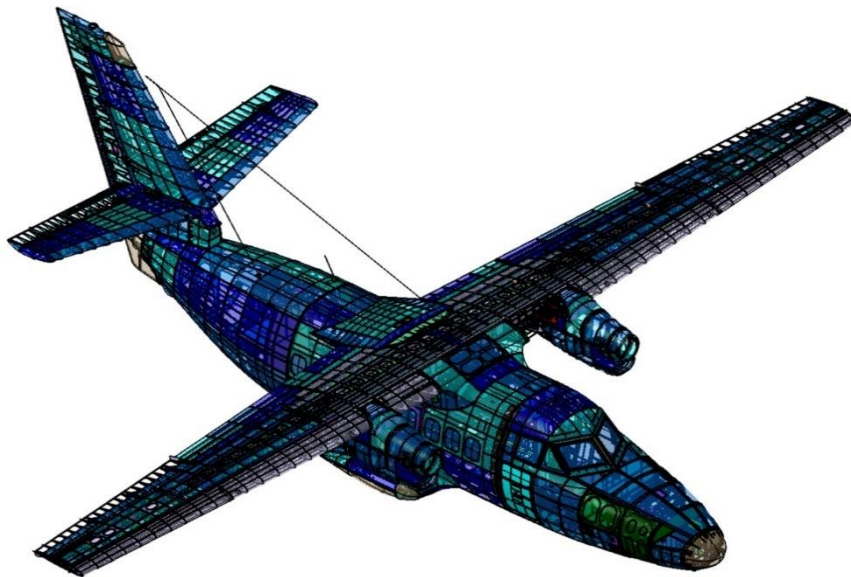
ÚVOD	9
1 ROZBOR ZADÁNÍ.....	10
2 TVÁŘENÍ NEPEVNÝM NÁSTROJEM.....	12
2.1 Wheelon.....	13
2.1.1 ŽĐAS CTV 16000.....	14
2.2 Guerin.....	15
2.2.1 Dieffenbacher PO 630	17
2.2.2 HL 1500.....	18
2.2.3 ACB EMC	19
2.3 Flexform	20
2.3.1 Quintus QFC.....	21
3 LEMOVÁNÍ.....	22
3.1 Vady	23
3.2 Parametry procesu lemování	24
3.2.1 Přímý lem	25
3.2.2 Vydutý lem	26
3.2.3 Vypuklý lem	27
3.3 Mezní tvářitelnost.....	28
4 MATERIÁL D16.....	30
4.1 Zařazení materiálu D16	31
4.2 Vliv TPZ na proces tváření plošných dílců z materiálu D16	32
4.2.1 Deformační zpevnění materiálu.....	33
4.2.2 Tepelné zpracování.....	34
4.2.3 Precipitační zpevnění.....	35
5 NÁVRH ŘEŠENÍ.....	37
5.1 Analýza výroby	38
5.1.1 Rozbor polyuretanového lisovníku v návaznosti na tvářecí proces.....	41
5.2 Varianty technologického postupu výroby.....	43
5.3 Mechanická zkouška tahem.....	47
5.4 Možná řešení	52
5.4.1 Úprava konstrukce nástroje	53
5.4.2 Úprava konstrukce plechového polotovaru	57
5.4.3 Kombinace změny konstrukce a parametrů tváření	59
ZÁVĚR.....	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	66
SEZNAM PŘÍLOH	67

ÚVOD

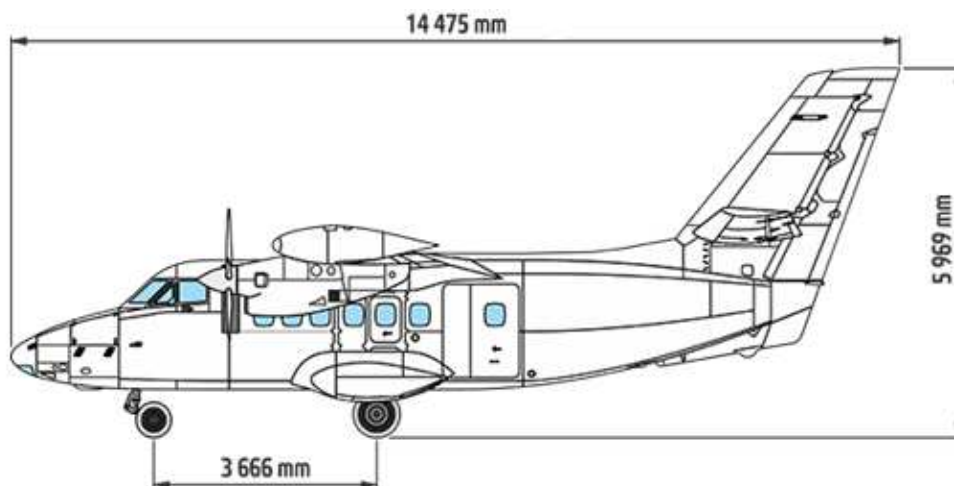
Plošné tváření je v dnešní době běžně používanou technologií zpracování tenkostěnných polotovarů. Je stále progresivní a vývoj těchto metod jde stále kupředu. Tvářené součásti mají v dnešní době dominantní uplatnění v průmyslu a jsou využívány téměř ve všech odvětvích. Neustálým vývojem, snižováním výrobních časů, redukcí nákladů a zlepšováním podmínek při tváření vznikly i metody elastoformingu. [1,2,3,4]

Tyto výrobní technologie se řadí mezi nekonvenční technologie tváření, jelikož využívají silového působení pružného či kapalného prostředí, a v některých případech i nestandardních parametrů při tváření. Vůči konvenčním technologiím pro zpracování plechů, kterými jsou například ohýbání nebo tažení, je možné rychleji tvořit složité dílce s různorodým tvarem. [1,2]

Jedná se převážně o lemované a různě prosazované dílce, které musí zároveň splňovat ty nejvyšší požadavky na rozměrovou i tvarovou přesnost při následné montáži. Tyto metody nalézají uplatnění jak v malosériové, tak i v kusové nebo prototypové výrobě zejména leteckého (obr. 1 a obr. 2) a automobilového průmyslu pro výrobu výztužných žebér a prolisovaných součástí. [1,3]



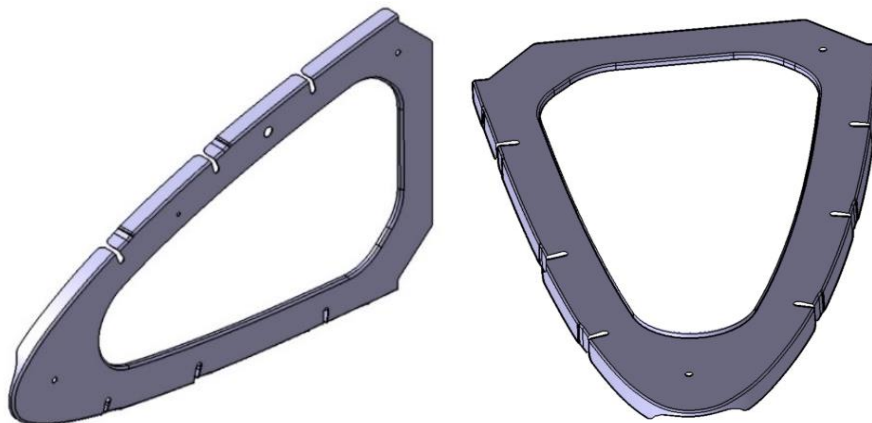
Obr. 1 L410 NG.



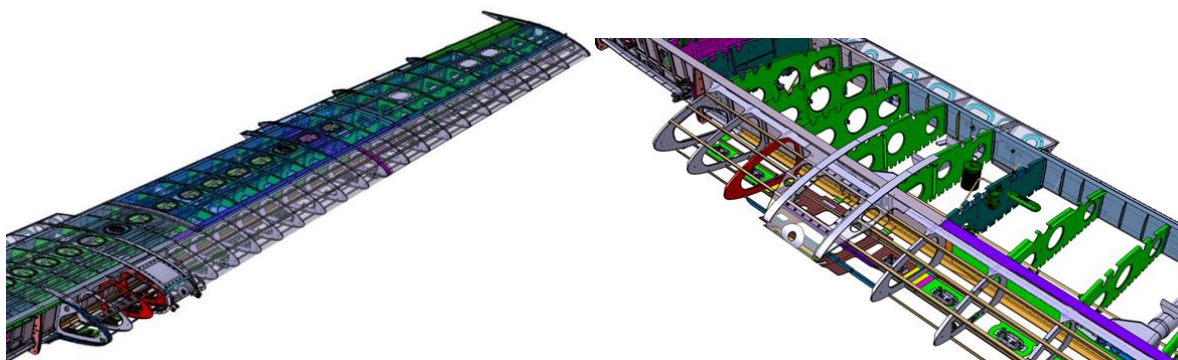
Obr. 2 L410 UVP-E20 [5].

1 ROZBOR ZADÁNÍ

V rámci diplomové práce je řešena součást z hliníkové slitiny, z plechu tloušťky 0,8 mm, obr. 3. Dílec funguje jako žebro náběžné hrany křídla letounu L410. Žebro je v sestavě křídla spojeno s nosníkem a potahovým plechem za pomoci nýtů. Na závěr montáže jsou zhotoveny otvory pro nýty. Tyto otvory jsou zhotoveny až při ručním sestavování, proto nejsou zohledněny při výrobě samotného dílce. Tento typ žebra se používá na obou stranách křídla. Vyrábí se tedy v levém a pravém provedení. Umístění červeně zvýrazněného žebra na křídle lze vidět na obr. 4. [6, 7]



Obr. 3 Žebro.



Obr. 4 Detail umístění na křídle.

Materiálem, používaným ke zhotovení žebra, je hliníková slitina D16, jež je před samotným tvářením žháná k docílení stavu měkkého, označovaného D16č M. Díky tomuto tepelnému zpracování lze plech lépe vytvarovat do konečného tvaru bez větších problémů s trhlinami, velkým zvlněním a dalšími možnými vadami, které při tomto způsobu výroby a tvaru součástí mohou nastávat. Při výrobě je však nutné dodržení i vhodných podmínek tvářen. Tento materiál zároveň přirozeně stárne neboli vytvrzuje, a proto je zpracování vyžháného plechu nutné provést nejlépe ihned po tepelném zpracování. V opačném případě je nutnost plech neprodleně vložit do mrazícího boxu pro zpomalení přirozeného stárnutí, tím se dosáhne prodloužení možného času ke zpracování polotovaru. [6, 7, 8]

Tab. 1 Chemické složení D16č [8].

Obsah [%]	Cu	Mg	Mn	Si	Fe	Zn	Ni	Ti	Al	Ostatní
Min.	3,8	1,2	0,3	-	-	-	-	-	zbytek	-
Max.	4,9	1,8	0,9	0,2	0,3	0,1	0,05	0,1		0,1 (jednotlivě 0,05)

Příprava polotovaru pro samotné tváření spočívá ve vyfrézování rozvinutého tvaru, viz obr. 5, z tabule plechu na tříosé CNC horní frézce CRENO AERO, obr. 6. Tím se eliminuje ruční dokončování obrysu s možným rizikem vytvoření defektů. Vady by mohly následně iniciovat vznik únavových trhlin v dílci. Najednou může být zpracováváno více plechů, čímž je docíleno vyšší produktivity výroby a snížen čas práce stroje. Stane se tak naskládáním na sebe a přišroubováním ke stolu. Jako vrchní vrstva je použit překrývací plech, jenž může být také nazýván krycí. Zabraňuje se tím poškrábání při samotné výrobě tvaru. [9]



Obr. 5 Rozložení při frézování.



Obr. 6 CRENO AERO.

Zpracování těchto typů žeber probíhá v převážné míře pomocí elastoformingových metod. Ty jsou řazeny mezi nekonvenční metody díky používání takzvaného nepevného nástroje. Tím se rozumí, že jedna z funkčních částí konvenčního kovového nástroje je nahrazena nepevným tvářecím médiem. Kapalina nebo elastomer tedy zastává funkci lisovnice. [10,11]

Předkládaná diplomová práce je řešena ve spolupráci s firmou Aircraft Industries a.s. (obr. 7), která daný dílec vyrábí a používá. Cílem je analýza procesu výroby, snížení výskytu vad a odstranění ručních prací z technologického postupu. Především se jedná o přípravné operace před lisováním, které zahrnují předklepání a postahování plechového polotovaru. [12]

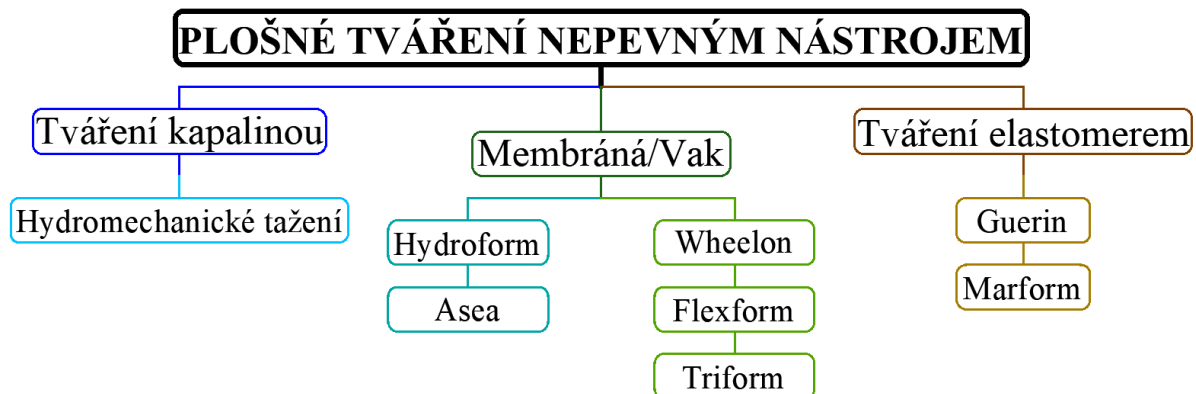
V rámci obnovení a modernizace strojového parku, možnosti výroby během poruch a plánovaných odstávek a zvýšení produktivity výroby se firma rozhodla pořídit nový elastoformingový lis. Ve výběrovém řízení bylo rozhodováno mezi lisy od firem ACB a Quintus. Po sérii experimentů, zhodnocení ekonomických nákladů a vhodnosti použitých metod u těchto strojů k výrobě dílců ve firmě, bylo doporučeno pořídit lis od firmy ACB, který díky nižší pořizovací ceně s příslušenstvím, lepší dokumentací a dostupností servisu se jeví jako vhodnější volba. [13,14]



Obr. 7 Aircraft Industries, a.s. [15].

2 TVÁŘENÍ NEPEVNÝM NÁSTROJEM

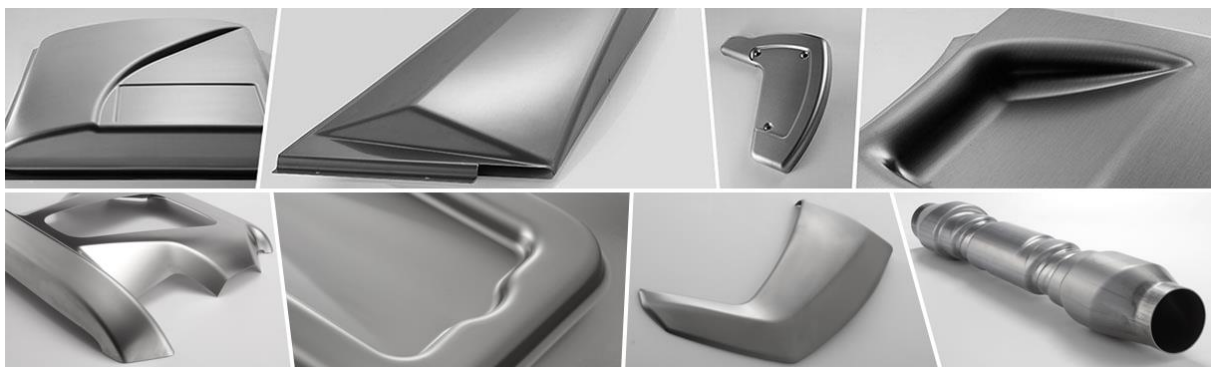
Při technologiích tváření nepevným nástrojem je jedna část nástroje pevná - kovová a druhá nepevná - tvořená tzv. tvářecím médiem. Pevná část nástroje udává výlisku jeho výsledný tvar. Nepevná část během procesu tváření vybudí tvářecí sílu a potřebný tlak k přetvoření polotovaru. Pro nepevnou část jsou dle aktuálního případu tváření použity elastomery nebo určité druhy tekutin, případně jejich kombinace. Je tomu tak pro jejich společné vlastnosti téct, přizpůsobit svůj tvar aktuálnímu dílci a v případě kapalin být téměř nestlačitelný. Rozdělení těchto metod pro plošné tváření lze vidět na obr. 8. [9, 10, 16, 17, 18]



Obr. 8 Rozdělení plošného tváření nepevným nástrojem.

Použití kapalin jako nepevného prostředí nachází své uplatnění v celé řadě metod, a to zejména z důvodu jejich obtížné stlačitelnosti. Jako médium je nejčastěji použita voda, někdy je však vhodné použít z technologických důvodů různé emulze a oleje. Ty snižují tření a zabraňují otěru při tváření nebo dopomáhají ohřevu obtížně tvářitelných slitin. [10, 11, 16, 17, 18, 19, 20, 21]

Tváření elastomery a kapalinou má jednoznačně vyšší potenciál vůči konvenčním metodám. Snáze se zhotoví složité 3D tvary a experimenty bylo zjištěno, že i výsledné odpružení materiálu po tváření je v porovnání s konvenčními metodami menší. Na téměř každý tvar dílce je možné najít vhodné tvarové řešení bloku nebo vaku elastomeru a koncepci celé lisovnice v kombinaci s vhodnými podmínkami stroje. Tím se dají snížit požadavky na výkon stroje, konstrukci, nebo i zvýšit životnost elastomerové desky nebo vaku. Navíc při těchto postupech není nutné slícování lisovníku a lisovnice, tím je docíleno snížení manipulačních časů. Příklady dílců vyráběných metodami tváření nepevným nástrojem jsou na obr. 9. [10, 11, 16, 17, 18, 22]

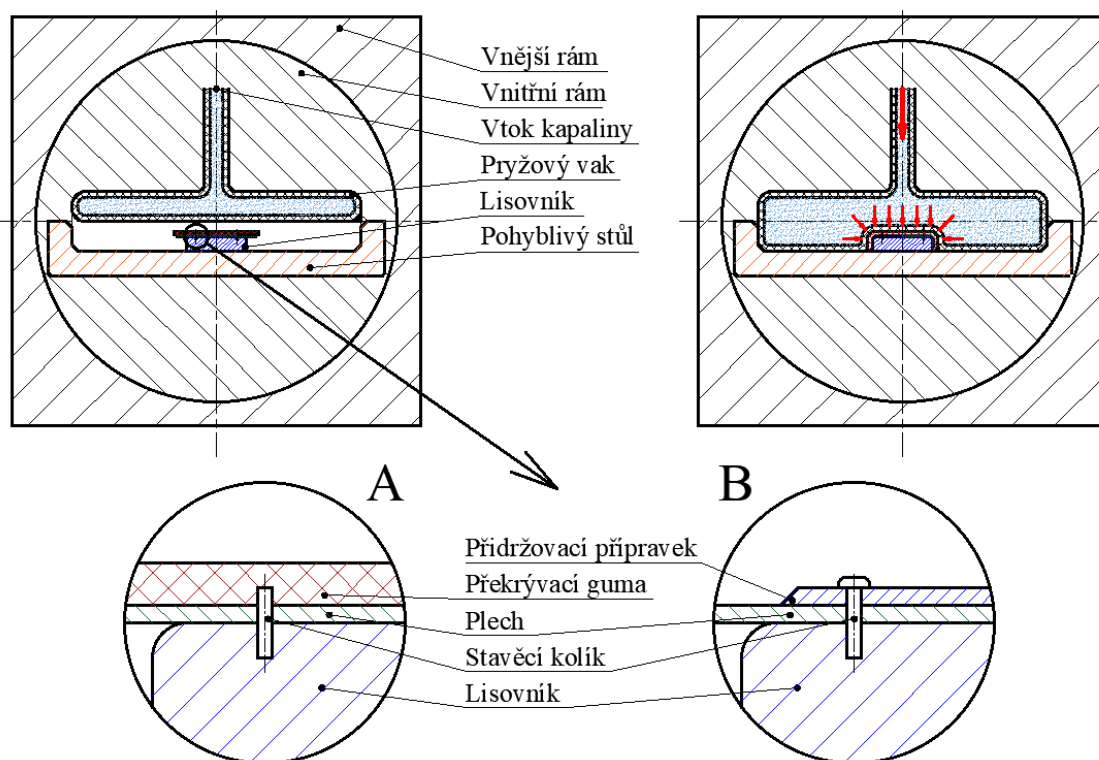


Obr. 9 Vyráběné dílce [23].

Mechanické chování elastomerů je závislé na více faktorech. Důležitou roli hraje především teplota, při které je používán. Elastomery aplikované při teplotách nižších než $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ se svými vlastnostmi, zejména tuhostí, přibližují kovovým materiálům. Při teplotách nad $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ dochází naopak k výraznému poklesu jejich tuhosti. Navíc při jejich použití nelze zanedbat Mullinsův efekt, jenž může značně ovlivnit výsledné vlastnosti tvářeného dílce. [10, 11, 16, 17, 18]

2.1 Wheelon

Princip této metody spočívá v působení tlaku kapaliny přes pryžový vak na samotný dílec. Výroba součásti probíhá přes lisovník, jenž má negativní tvar výrobku, obr. 10. Samotný proces probíhá tak, že je plech ustaven na nepohyblivý lisovník pomocí kolíků pro přesné vymezení, viz obr. 10 A, B. Následně je položen na pohyblivý stůl a překryt krycí gumou nebo polyuretanem, obr. 10A. Překrytí se využívá především kvůli zabránění vniknutí kolíků do lisovacího vaku a případnému zamezení jeho poškození nebo v horším případě protržení. Dalším důvodem je možné lepší vytvarování samotného dílce. Před započítím samotného tváření stůl vjede do stroje tvořeného ocelovými nebo litinovými armaturami trubkového tvaru a zajistí se proti pohybu. Poté již přichází samotný proces tváření plechu. Do vaku je přiváděna kapalina, která vak roztahuje a postupně se, se zvyšujícím se tlakem, nabaluje na lisovník. Současně s sebou nese i založený plech, který tvaruje podle lisovníku. Po dokončení operace je vak postupně odtlakován a odjištěný stůl vyjede s vytvarovaným dílcem ven ze stroje. [10, 16, 17, 18, 19]



Obr. 10 Wheelon [10].

Stroje lze rozdělit na dvě skupiny. Dvoustolové stroje jsou univerzálnější, neboť dva stoly umožňují různé nastavení hloubky lisování. Díky tomu lze vyrábět více různých dílců bez nutnosti úpravy konfigurace stolu. Zároveň lze využít dobu, při které je dílec z prvního stolu vylisován a sundáván z lisovníku pro lisování dílců na druhém stole. Jednostolové stroje jsou naproti tomu kompaktnější, avšak využitelný čas pro lisování je snížen o výměnu dílce a ustavení plechu. Z těchto faktů vyplývá, že při výrobě více různých dílců je ekonomicky výhodnější dvoustolový stroj i když investice do nákupu bude větší. Naproti tomu je jednostolový stroj vhodnější pro prototypovou nebo zkušební výrobu. [10, 17, 19, 20, 21, 22]

Díky svým charakteristikám a snadnému nastavení tlaku, jenž je při tvářecí operaci všestranně stejný a působí rovnoměrně na tvářený materiál, je tato metoda velmi univerzální. Má své využití pro širokou škálu velikostí, tvarů a tloušťek dílců. Lze jí také při dodržení vhodných podmínek vyrábět tvarové povrchy. Nejvhodnější je především pro výrobu mělkých výlisků, lemování nebo žebrování. Mezi výhody metody Wheelon lze také zařadit vysokou produktivitu.

Díky charakteristice strojů je možná výroba více dílců najednou. Je to však podmíněno správným rozložením a dostatečně velkým stolem, který tato metoda využívá. Zároveň je docíleno nízkých energetických nároků. [10, 20]

Za nevýhody jsou považovány vysoká pořizovací cena stroje a pomocných zařízení. Také servisní náklady jsou nemalé. Dále je nutné dosáhnout vysoké těsnosti v hydraulickém systému. Mezi nevýhody lze také zařadit velké rozměry stroje. [10]

Za nejznámějšího výrobce strojů pro metodu Wheelon lze označit firmu Verson. V Česku stroje tohoto typu vyráběla firma Žďas, a s., kde typickým zástupcem metody Wheelon jsou stroje typu CTV. [10]

2.1.1 ŽĐAS CTV 16000

Tunelový vakový lis CTV (obr. 11) byl firmou vyvinut pro malosériovou, kusovou a prototypovou výrobu výlisků. Jeho uplatnění je především v leteckém průmyslu, ale může být využit i pro výrobu prototypů v automobilovém průmyslu. Výlisky jsou vyráběny tak, že na vyjížděcí stůl jsou umístěny lisovníky. Ty jsou vyrobeny z lehce obrobitelného, ale odolného materiálu. Následně jsou položeny a ustaveny plechové polotovary. V pracovním cyklu zajede stůl do tunelového stojanu a je zajištěn proti pohybu. Výlisky jsou pak tvářeny do konečného tvaru vysokotlakou kapalinou, která na ně působí přes gumovou membránu tlakového vaku. Dvoustranný stůl stroje umožňuje přípravu dalšího cyklu lisování v průběhu vlastní pracovní operace. Parametry stroje jsou přehledně shrnuty v Tab. 2. [24, 25]



Obr. 11 ŽĐAS CTV 16000 [26].

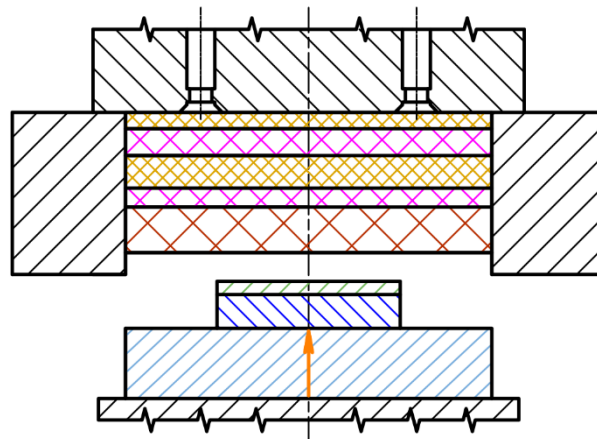
Tab. 2 Charakteristika vakového lisu CTV 16000 [24]

Jmenovitá síla	Pracovní tlak ve vaku	Pracovní plocha	Maximální hloubka	Výkon hlavního motoru
160 MN	až 350 bar	1050 x 2980 mm	240 mm	85 kW

V současnosti se tento typ stroje již nevyrábí a v praxi se lze setkat již jen se starými modely. V dnešní době lze najít novější stroje, jež splňují náročné požadavky na výrobu a dosahují vyšších tlaků a lepších charakteristik při procesu tváření. Údržba a opravy starých strojů, vzhledem k nedostupnosti dílů a nutnosti kvalifikovaných pracovníků, jsou značným ekonomickým zásahem do rozpočtu a odstávky takto vzniklé kvůli tomu nabírají velké časové intervaly. [24, 25, 26]

2.2 Guerin

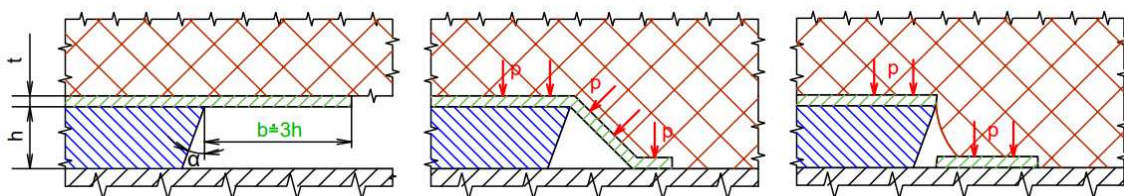
Při této metodě jsou elastomerové desky upevněné v kufru neboli lisovnici situované v horní části stroje. Pro co nejlepší výsledky tvarování se zde využívá vhodná kombinace vlastností desek. Při zvolení správných parametrů tváření a vhodného složení desek dochází ke vtláčování lisovnicku se zafixovaným plechem do elastomerových desek a tím ke tvarování plechu dle tvaru lisovnicku. Tlak vyvozený elastomerem je na celém povrchu a ve všech směrech téměř stejný, a i proto nedochází ke změně tloušťky tvarovaného plechu. Po dokončení procesu a vyjetí kufru se elastomer vrátí do svého původního tvaru a následně lze vyjmout výrobek. Metoda guerin je vyobrazena na obr. 12. [11, 16, 17, 18, 27]



Obr. 12 Guerin [27].

Tlak při této metodě může být vyvozen dvěma způsoby. Prvním je pohyb stolu s lisovnickem směrem nahoru k nepohyblivé lisovnici s elastomerovými deskami, anebo druhým způsobem, kdy se pohybuje lisovnice dolů k nepohyblivému stolu s umístěným lisovnickem. V praxi se více vyskytují stroje s pohyblivým stolem, neboť pohyb těžkého kufru by byl nákladný. Konstrukce kufru a jeho složení musí splnit podmínku, aby vložené pláty gumy při pohybu stolu s lisovnickem nepřetekly hranu kufru a nebyly stolem uštěpeny, jedná se totiž o metodu lisování v uzavřeném nástroji. [11, 16, 17, 18, 27]

Metoda je vhodná pro mělké tažení, ohýbání a při použití tvrdších elastomerů a vhodné úpravě lisovnicku i pro stříhání, obr. 13. To však přináší i omezení a problémy s tím spojené. Je nutné vyvodit vysoké tlaky. Tahové i ohybové napětí jsou při této metodě normálového charakteru, a tak téměř nedojde ke stříhu materiálu, ale k jeho postupnému odtrhnutí, což velmi ovlivní kvalitu stříhané plochy. Ohybová složka napjatosti je náchylná k tvorbě rádiusu podél uštěpené hrany plechu, což může znemožnit použití v přesných aplikacích a ovlivnit správnou funkčnost stříhaného výrobku. [11, 16, 17, 18, 27]



Obr. 13 Stříhání [27].

Všechny tyto problémy lze řešit vhodnou konstrukcí lisovnicku, zkosením a vytvořením hrany, použitím vysokovýkonných strojů, mazáním. Při správných podmínkách a konstrukci lze plech i děrovat. To má však své omezení ve velikosti otvoru vzhledem k charakteristikám stříhaného materiálu, elastomeru a rozměrovým charakteristikám dílce. Také zde hraje významnou roli tření, rychlost deformace a tlak. Proto touto metodou lze děrovat otvory větších průměrů, a to

z důvodu, že plocha otvoru musí poskytnout dostatečnou střížnou sílu. [11, 16, 17, 18] Musí tedy platit podmínka [27]:

$$\frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot p \geq \pi \cdot d \cdot t \cdot \tau_s, \quad (2.1)$$

kde: π - konstanta,
 d - průměr otvoru [mm],
 p - tlak [Pa],
 t - tloušťka plechu [mm],
 τ_s - napětí ve smyku [MPa].

V praxi nejčastěji používaným materiálem lisovnic je polyuretan. Ten se pro jednotlivé aplikace liší hlavním určujícím parametrem, kterým je tvrdost dle Shoreho. Podle této charakteristiky jsou rozdělovány barevně, neboť určování ve výrobě by bylo zdlouhavé. Příklad takového rozdělení je na obr. 14. Pro stříhání je nejvhodnější použití polytanu v rozmezí 75-85 Shore, pro tváření je lepší použít měkčí polytany shruba 55-65 Shore. [28]



Obr. 14 Typy polytanů [28].

Největším přínosem této metody je možnost stříhání s ohybem v jedné operaci. Je možné lisování různých tloušťek a materiálů díky univerzálnosti a jednoduchému nastavení stroje. Ušetření výdajů je i díky jednoduché konstrukci nástroje. Nezanedbatelnou výhodou je i možnost rychlé výměny lisovníků. [11, 15, 16, 17, 26]

Za hlavní slabinu procesu může být označeno opotřebení elastomerové lisovnice. I když možnost stříhání je výhodou, je zde omezení tloušťky plechu, použití vhodného materiálu lisovnice a též je nutná úprava konstrukce lisovníku. Také čas tvářecí operace není nejkratší. Všechny tyto vlivy se projeví v celkových nákladech na výrobu a údržbu stroje. U většiny dílců vyrobených touto metodou je nutné dokončení výsledného tvaru. Většinou se jedná o klempířské práce, doklepání a stahování. Stahování lze provádět například na stroji Eckold HF 100, který je na obr. 15. Ve výčtu nevýhod je dobré zmínit i velké rozměry strojů. [11, 27]



Obr. 15 Ruční tvářec Eckold HF 100 [29].

2.2.1 Dieffenbacher PO 630

Stroj Dieffenbacher PO 630 je hydraulický lis svařované rámové konstrukce s jedním beranem, obr. 16. Určen je pro práci shora dolů. V horním příčniku je hlavní jednočinný válec, zajišťující vyvození pracovního tlaku. V bocích lisu jsou umístěny dva zpětné válce, které zabezpečují zpětný chod. Ve své horní poloze je beran jistěn pomocí dvou čepů ovládaných hydraulickými válci. [6, 30, 31]



Obr. 16 Dieffenbacher PO 630.

V roce 2019 byla ukončena jeho modernizace. Došlo ke zjednodušení obsluhy, vybavení bezpečnostními prvky a umožnění plné nastavitelnosti pracovního zdvihu, tlaku, rychlosti přiblížení i tváření. Vybavením tohoto stroje lisovací nádobou, ponornou deskou a vhodným nastavením parametrů umožňuje lisování dílců metodou guerin nebo marform. Nejdůležitější parametry lisu jsou shrnuty v Tab. 3.[30, 31]

Tab. 3 Charakteristika lisu PO 630 [31].

Maximální pracovní síla	Pracovní tlak ve kufru	Pracovní plocha	Pracovní rychlost	Výkon hlavního motoru
6300 kN	až 200 bar	650 x 450 mm	4,5 až 17,5 mm·s ⁻¹	55 kW

Nevýhodou stroje je menší pracovní prostor, kdy lze umístit na ponornou deskou pouze jeden středně velký nástroj s plechovým polotovarem nebo více malých na jeden cyklus lisu. Dalo by se proto říct, že z hlediska časového využití práce dělníka je stroj méně efektivní, což může mít za následek prodražení výroby.

2.2.2 HL 1500

Pracovní stroje Teplice, spol. s r.o. přišly na trh s hydraulickým lisem rámové konstrukce, viz obr. 17. Ta je tvořena dvěma lamelami spojenými rozpěrnými tyčemi. Lisovací sílu vytváří dva hydraulické plunžry, viz obr. 17b. Beztaké pohyby obstarávají dva dvojčinné přímočaré hydromotory. Pro pohyby stolu jsou taktéž použity dva přímočaré hydromotory. [32]



a) čelní pohled



b) pohled na plunžry

Obr. 17 HL 1500.

S ohledem na zlepšení možnosti obsluhy a případných oprav je hydraulický agregát umístěn za lisem. Rozvaděč s řídicími elektroobvody je pro možnou kontrolu situován vně bezpečnostního oplocení, zabráňujícímu vstup do prostoru lisu. Pro zvýšení bezpečnosti je lis vybaven přibližovacími snímači a bezpečnostním závěsem. Ovládání lisu je soustředěno do centrálního panelu, který se nachází vedle lisu. [32]

Lisovací operace stroje je principiálně opačná než u PO 630. Všechny pracovní pohyby vykonává pohyblivý stůl. Tvářecí operace tedy probíhá zespoda zatlačováním stolu s ponornou deskou, na které jsou položeny nástroje do kufru upevněného na horní desce. Lisovací nádoba je pevná nepohyblivá tvořená ze sešroubovaných pancéřových skruží. Charakteristika parametrů stroje je shrnuta v Tab. 4. [32]

Tab. 4 Charakteristika lisu HL 1500 [32].

Maximální pracovní síla	Pracovní tlak v kufru	Zdvih plunžrů	Pracovní rychlost	Výkon hlavního motoru
15000 kN	až 270 bar	1000 mm	2,5 až 5 mm·s ⁻¹	45 kW

Nedostatkem stroje je menší pracovní prostor. Také konstrukce samotného lisu není příliš vhodná, neboť stůl lisu není vybaven vedením. Při vyšších tlacích může dojít ke zkřížení a zablokování stroje.

2.2.3 ACB EMC

Nejmodernější stroje typu EMC (obr. 18) od firmy ACB vycházejí z dlouhodobých zkušeností a poznatků. Vyrobeny jsou z moderních konstrukčních materiálů pro docílení jednoduché, funkční, odlehčené konstrukce stroje. Dosahuje se vysoké produktivity díky velké pracovní ploše. Je zde rychlá a snadná výměna lisovacích desek z různých materiálů a možná integrace automatického manipulačního systému na výměnu nástrojů. [34,35]



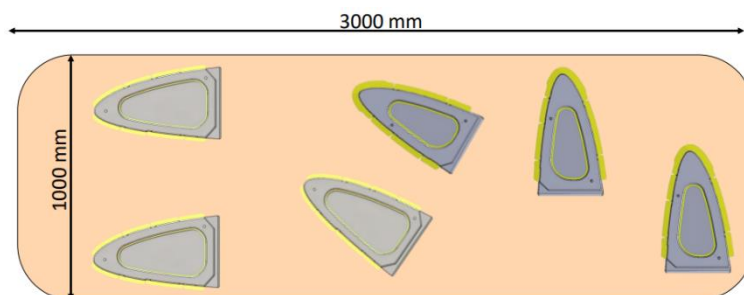
Obr. 18 ACB EMC [35].

Stroj lze vyrobit dle požadavků zákazníka co se týče rozměrů, tlaků, počtu stolů, pracovních sil a dalšího přídavného vybavení. Přehled některých již vyrobených a používaných strojů s parametry je přehledně uveden v Tab. 5. [34]

Tab. 5 Přehled strojů ACB EMC [34].

Model	EMC 3500	EMC 6300	EMC 8500	EMC 12500
Pracovní plocha [mm]	840 x 610	1400 x 700	1700 x 800	2200 x 960
Lisovací síla [kN]	34000	61500	83000	122500
Maximální lisovací tlak [bar]	800	800	700	650
Maximální výška lisování [mm]	90	90	90	200

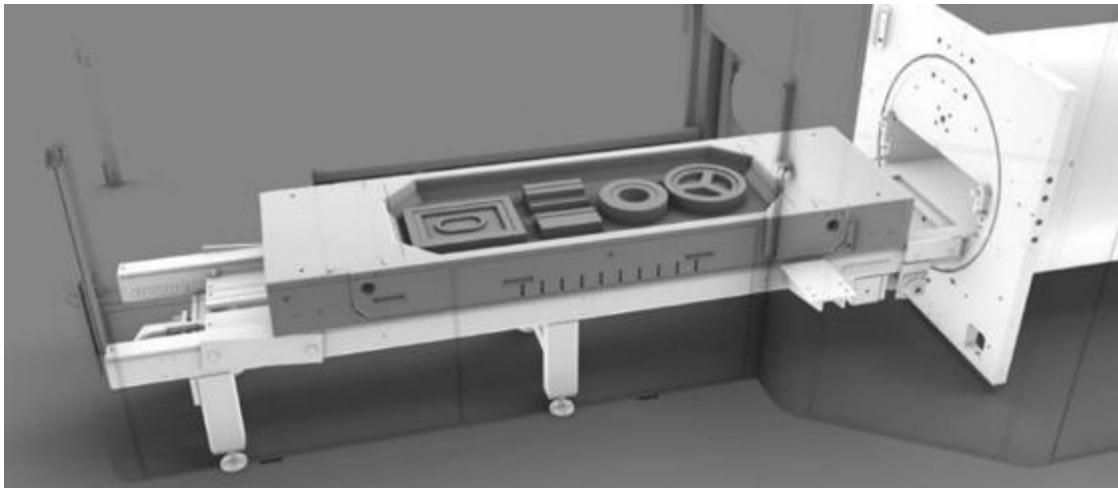
U tohoto typu stroje je princip tvářecí operace následovný. Všechny pracovní pohyby vykonává pohyblivý plochý stůl. Tvářecí operace tedy probíhá zespoda nahoru zatlačováním stolu s položenými nástroji do tvářecího média. Lisovací nádoba je pevná nepohyblivá vybavená hydraulickými válci pro vytlačení tvářecích desek. Možné rozložení lisovníků na stole je omezené pouze rozestupy mezi nástroji a rozměry stolu a výrobků obr. 19. [34, 35]



Obr. 19 Možné rozložení na stole [36].

2.3 Flexform

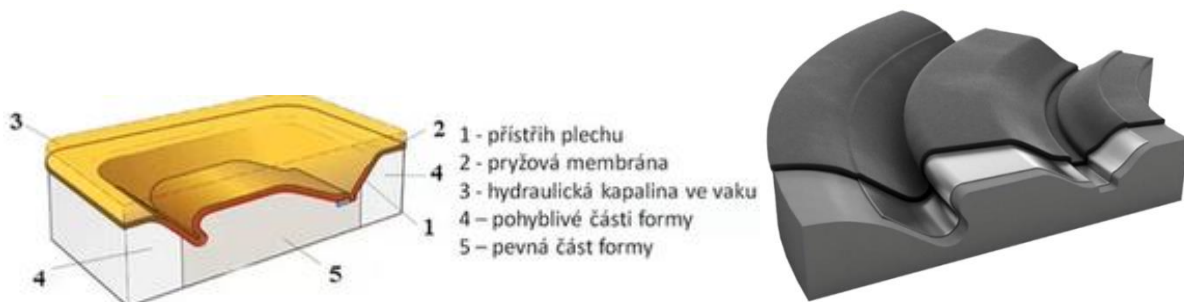
Flexform je moderní obdobou metody Wheelon. Jedná se tedy také o tváření pomocí tlaku kapaliny přes pryžovou membránu. Metoda je určena především pro malosériovou a prototypovou výrobu. Největší výhodou je možnost tváření dílců s negativními plochami, které by pevnou lisovnicí vyrobít nešly. Je nutné mít vhodně dělený lisovník a dostatečně pružnou, ale zároveň pevnou pryžovou membránu. Je to proto, aby se dostala do všech míst složitého negativního tvářeného tvaru. Tváření totiž musí správně proběhnout při různých tloušťkách a druzích tvářeného materiálu. Proto je kladen důraz na materiál membrány, aby nedošlo k jejímu poškození a případnému následnému vytečení tlakové kapaliny. [10, 18, 20]



Obr. 20 Schéma metody Wheelon [37].

Lisovník se bez nutnosti uchycení umístí do pracovního prostoru stolu a je na něj umístěn a většinou pomocí kolíků ustaven plech. Následně stůl vjede do pracovního prostoru stroje a zároveň se pracovní plocha překryje krycí gumou. Následně dojde k postupnému zvyšování tlaku a membrána postupně vytvaruje požadovaný tvar. Současně v první fázi plní i funkci přidržovače. Pro ideální vytvarování je nutno vyvodit vysoký tlak, aby i nejmenší detaily dílce byly zhotoveny správně. Díky těmto vysokým tlakům jsou výrobky této metody tvarově velmi přesné, s minimálním odpružením, ale přitom je membrána velmi namáhána a rychle se opotřebovává. [10, 18, 20]

Největší předností metody Flexform je především úspora lisovacích nástrojů a z toho vyplývající snížení ekonomických nákladů. Dalším výrazným faktorem je vysoká produktivita metody. To je docíleno díky velkým stolům, na které lze umístit několik lisovníků s plechy najednou. Touto metodou lze současně tvářet i těžkotvařitelné materiály. Důležitou výhodou je výroba negativních tvarů (obráz. 21), čehož pomocí konvenčních metod nelze docílit. Také lze jako u metody Wheelon vytvářet tvarové povrchy na dílcích. To vše je dosaženo při dodržení těch největších nároků na tvarovou přesnost. [10, 18, 20]



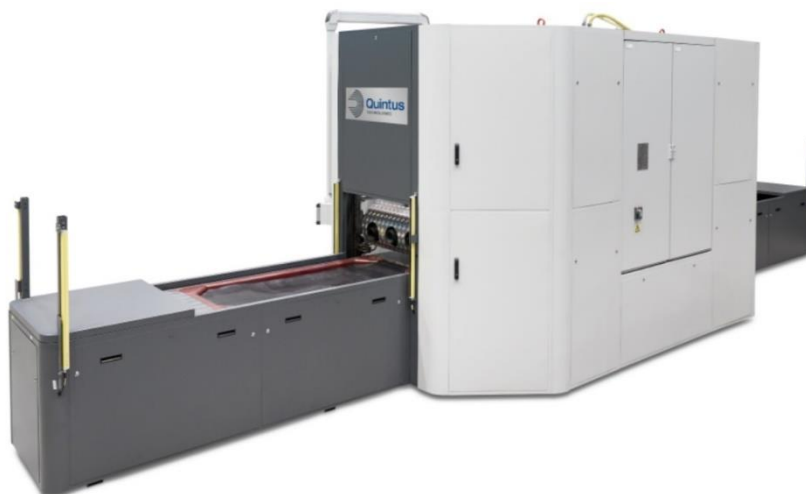
Obr. 21 Negativní tvar [10, 38].

Jako největší nevýhoda metody se dá označit vysoká cena stroje a pomocného zařízení. Vyplyvá to z použití drahých vysokotlakých pump a nutnosti dodržet co největší těsnost v celém hydraulickém systému. Také je důležité zmínit, že při koupi zařízení je nutné počítat s přípravou velkého prostoru a nejlépe odhlučněním pro pumpy a pomocná čerpadla. [10]

Strojů, využívající metodu Flexform je velká řada a jsou vyráběny mnoha firmami po celém světě. Specifikace strojů je většinou na zakázku volena co nejvhodněji pro danou výrobu. Příkladem je moderní stroj od firmy Quintus řady QFC.

2.3.1 Quintus QFC

Nejmodernější lisy firmy Quintus prošly dlouhým vývojovým cyklem. Aktuálně je firma asi nejznámější, co se týče metod tváření nepevným nástrojem a jejich stroje jsou ve světě velmi rozšířené. Při tváření metodou flexform lisy typu QFC (obr. 22) pro dosažení vysokých tlaků používají jako tlakové médium ricinový olej.



Obr. 22 Lis typu QFC [39].

Tvarovanými dílci mohou být malé mělké komponenty, velké panely i geometricky složité hlubokotažené výrobky. Velké tlaky zajišťují vysokou přesnost a úzkou toleranci součástí přímo po tváření. Proto povětšinou již není potřeba dokončovacích ruční operací.

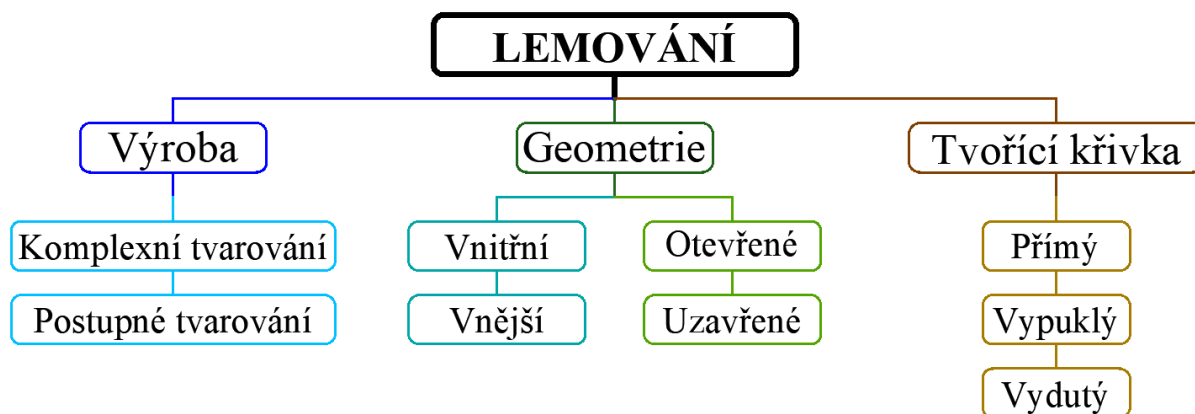
Společnost nabízí celou řadu standardních modelů lisů QFC s obdélníkovými stoly o rozměrech až 1,8 x 3,6 m a maximálně dosažitelnými tlaky do 1400 barů. Výsledné parametry lze tedy vhodně navolit dle požadavků na výrobu. Doba cyklu je obvykle pár minut v závislosti na velikosti a charakteristikách lisu, geometrii tvarovaných dílců a tvářeném materiálu. Výběr z možných variant strojů je shrnut v Tab. 6. [40]

Tab. 6 Přehled strojů QFC [40]

Model	QFC 1 x 3 -800	QFC 1,2 x 3 -1000	QFC 1,6 x 4 -1400	QFC 1,8 x 3,6 -1000
Pracovní plocha [mm]	1000 x 3000	1200 x 3000	1600 x 4000	1800 x 3600
Lisovací síla [kN]	300000	450000	1165000	912000
Maximální lisovací tlak [bar]	800	1000	1400	1000
Maximální výška lisování [mm]	220	280	400	360

3 LEMOVÁNÍ

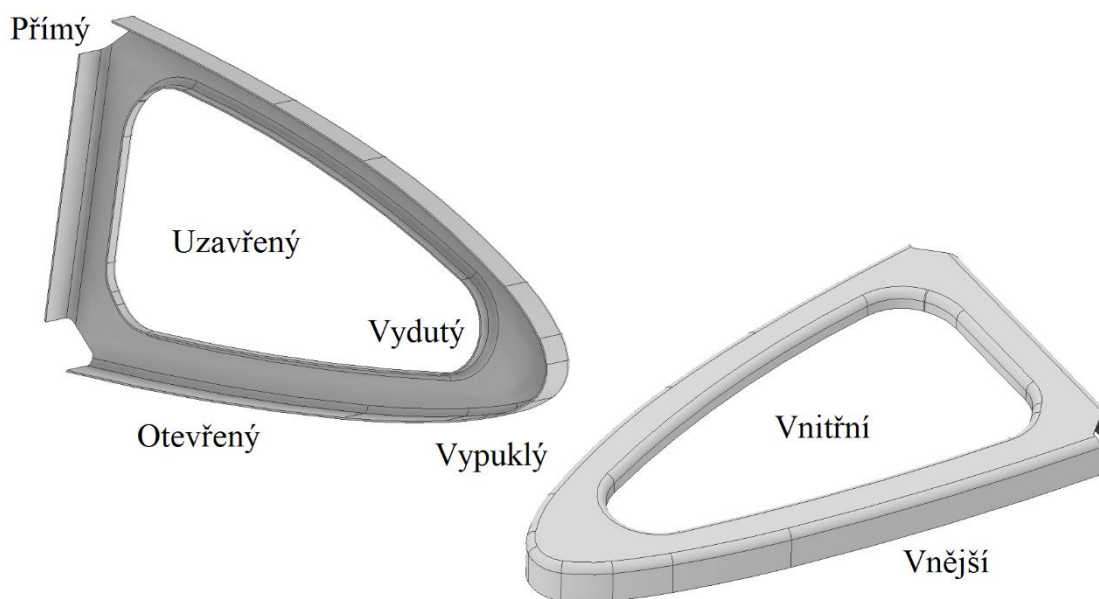
Jedná se o výrobní proces, jenž principiálně vychází z teorie ohýbání. U rozměrnějších plechových dílců je důležité z hlediska případného zborcení dílec vyztužit. Může se tak stát například opatřením součásti určitým druhem lemu. Při samotné technologii dochází k ohýbání okraje plechu rovinnou nebo obecnou plochou. Nejčastěji jsou projektovány na okraji plechových dílů. Dá se říct po obvodu tzv. tvořící křivky. Zpravidla se proto typy lemu dělí dle geometrie, postupu výroby a dle tvaru tvořící křivky, viz obr. 23. [1, 3, 21, 41]



Obr. 23 Rozdělení lemování [41].

Plech je tak potenciálně možné ohnout do libovolného tvaru, kdy je cílem dosáhnout požadované geometrie dílce. Zjednodušeně se dá říci, že jde o ohýbání přesahu plechu určité délky přes hranu matrice se záměrem vytvořit požadovaný úhel ohybu. Z převážné části se jedná o ohyby o 90° nebo 180°. Výsledkem celého postupu je zaoblení hran, vyztužení okrajů či dosažení dekorativního vzhledu tvářené součásti. V některých případech však jde o vytvoření plochy, která je potřebná pro následující spojování součástí. Metodu lze též aplikovat na vytvoření prolisů uprostřed nebo na okraji součásti pro zlepšení tuhosti. [1, 3, 21, 41]

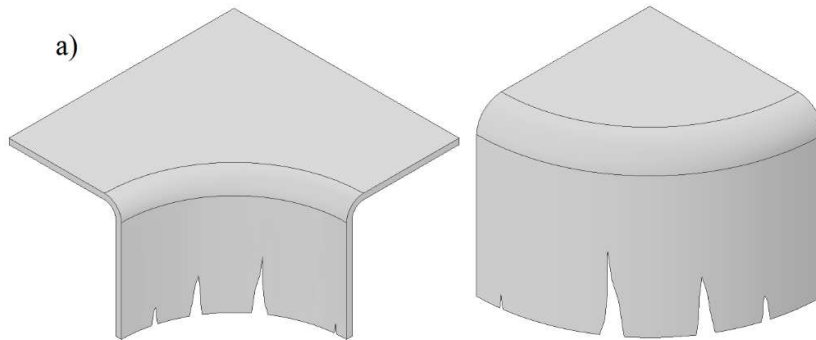
Při zhotovování lemu působí na plech kombinace tahového a tlakového namáhání. Lemování plechů lze zařadit mezi časově nenáročnou a nákladově efektivní technologii zpracování plechových polotovárů. Díky těmto skutečnostem je metoda v praxi vydatně využívána. Ukázkový dílec s popisem druhů lemu je možné spatřit na obr. 24. [1, 3, 21, 41]



Obr. 24 Druhy lemu.

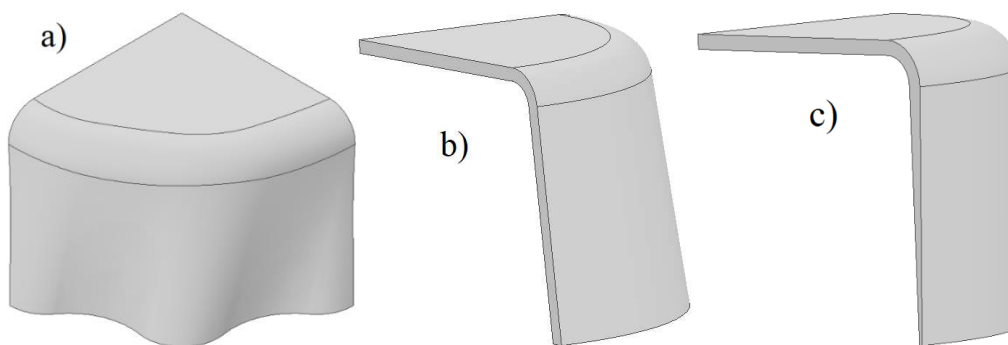
3.1 Vady

Jedním z nejdůležitějších hledisek při výrobě lemovaných plechových součástí je stav okraje plechu před operací. Proto je vhodné zamezit a kontrolovat vznik vad při přípravě plechového polotovaru. Patří sem nedostatky, kterými jsou vrypy, zátrhy, vnitřní vady materiálu, ale též zpevnění. Tím se snižuje riziko popraskání, obr. 25. Různým vadám lze zabránit vhodnou přípravou plechů, případně mezioperací zahrnující tepelné zpracování před lisováním. [1, 3, 41]



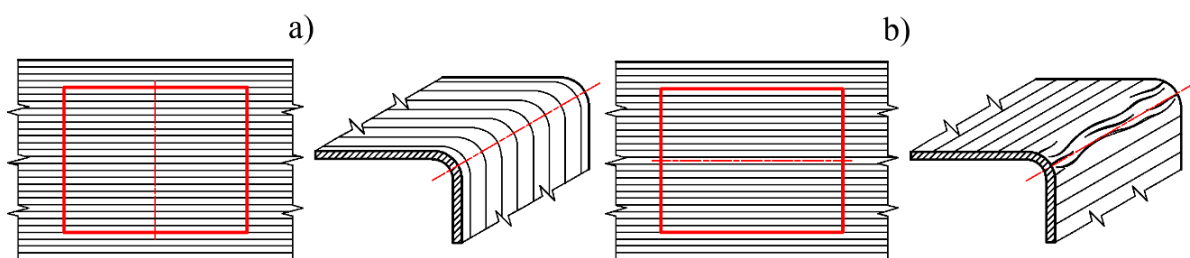
Obr. 25 Trhliny na lemu.

Jinými parametry, ovlivňujícími kvalitu tvářeného dílce, mohou být velikost použitého tlaku a tvar nástroje. Při správné konfiguraci ovlivňují nejvíce případný vznik zvlnění, viz obr. 26a). Zabránit této nepříjemnosti se dá také změnou geometrie lemu. Další chybou, která může být ovlivněna špatným nastavením tlaku, je odpružení, viz obr. 26b). Jinou možností, jak předejít odpružení, je úprava nástroje. Jedná se o zkosení o úhel, kterým ve výsledku dosáhneme požadovaného tvaru lemu. To však závisí i na charakteristikách tvářeného materiálu. Poslední chybou spojenou s tlakem je prodloužení lemu způsobené ztenčením stěny viz obr. 26c). Oproti odpružení, kde byl vyvozen tlak malý, tato vada je způsobena tlakem vysokým, kdy je materiál ohýbaného plechu po nabalení na lisovnick postupně tlačení ve směru tlaku. [1, 3, 41, 42, 43, 44]



Obr. 26 Druhy vad.

Dalším nezanedbatelným vlivem je rozložení dílce na tabuli s ohledem na směr vláken plechu (obr. 27). Avšak vzhledem ke složitosti některých dílců je toto kritérium těžko ovlivnitelné. Nejvhodnější je proto u každého dílce určit místo, ve kterém vzniká nejvíce problémů a pokusit se rozložení mu co nejvíce přizpůsobit. [41]



Obr. 27 Rozložení na plechu.

3.2 Parametry procesu lemování

U výroby lemů se vychází z momentové rovnováhy vnějších a vnitřních sil. V rovnici jsou zohledněny materiálové konstanty tvářeného materiálu a geometrické charakteristiky požadovaného lemu, viz obr. 28. [1, 3, 21, 41, 45] Díky těmto skutečnostem lze odvodit vzorec pro výpočet měrného tlaku, který je nutný pro výrobu požadovaného lemu [21]:

$$p_e \cdot \frac{a^2}{2} \cdot b = \frac{1}{4} \cdot b \cdot t_0^2 \cdot \sigma_k + \frac{D}{r_l \cdot \frac{t_0}{2}} \cdot J, \quad (3.1)$$

- kde: p_e - měrný tlak elastomeru [MPa],
 r_l - poloměr zaoblení lisovníku [mm],
 a - délka volného konce lemu [mm],
 b - šířka plechu [mm],
 σ_k - napětí na mezi kluzu [MPa],
 J - moment setrvačnosti daného průřezu [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$],
 t_0 - tloušťka plechu před tvářením [mm].

V praxi pro zrychlení možnosti vytvoření lemu jsou využívány experimentálně zjištěné vztahy, které mohou určovat přibližnou minimální výrobitelnou velikost lemu. Pro daný materiál, použitou technologii výroby a tvářecí podmínky je nezbytné zjistit odpovídající rovnici. [1, 3, 21, 41] Například pro materiál ČSN 42 4203 vyžíhaný, při působení měrného tlaku 10 MPa, tvářený nepevným nástrojem, je využíván vzorec [21]:

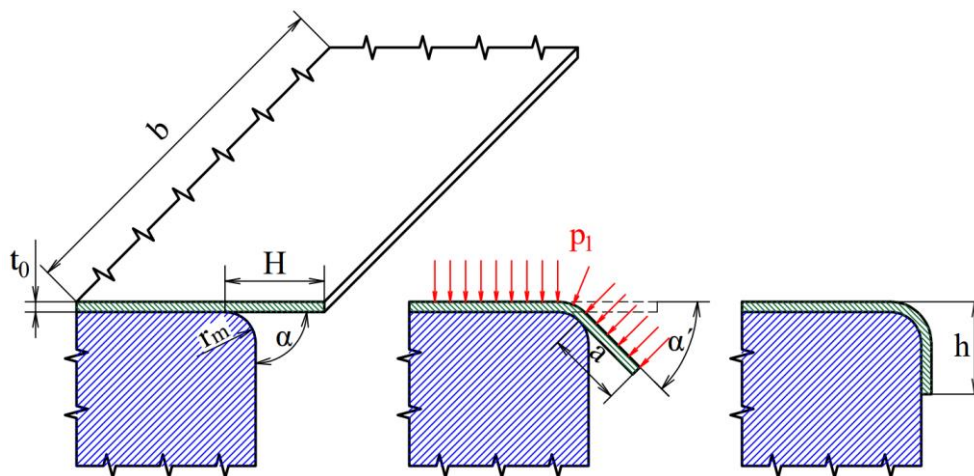
$$h_{\min} = r_{\min} + 5 \cdot t_0, \quad (3.2)$$

- kde: $h_{\min}$ - minimální výška lemu [mm],
 $r_{\min}$ - minimální poloměr zaoblení plechu [mm].

Dalším vzorcem, který může urychlit konstruktérovi práci, je výpočet rozvinuté výšky lemu neboli velikost přesahujícího okraje plechu. U tohoto výpočtu se zohledňuje požadovaná geometrie a tloušťka tvářeného materiálu. Proměnné jsou následně vynásobeny konstantami. [1, 3, 21, 41] Výsledná rovnice pro rozvinutou výšku lemu pro poměr ($r_m/t = 2,5$) má tvar [21]:

$$H = h - 0,43 \cdot r_m - 0,215 \cdot t_0, \quad (3.3)$$

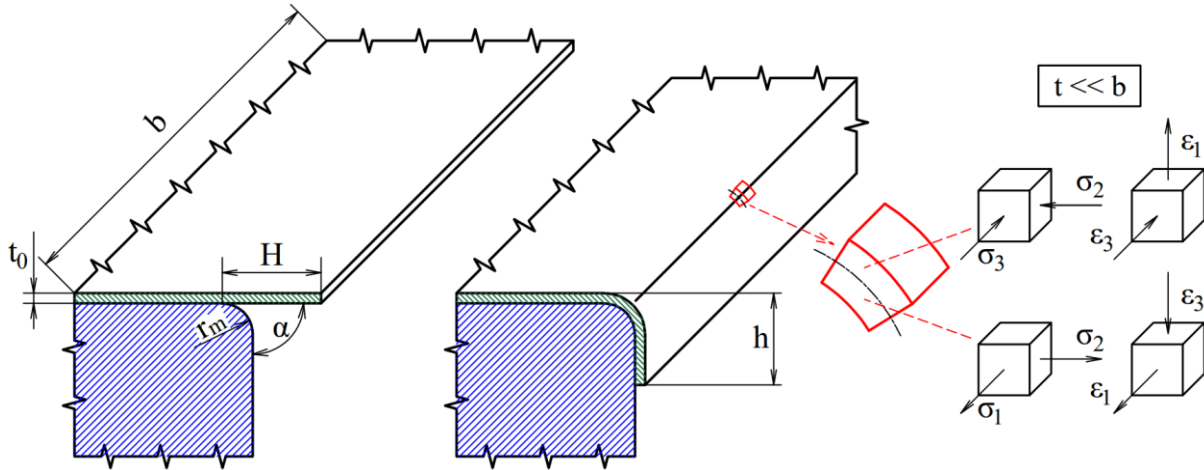
- kde: h - výsledná výška lemu [mm].



Obr. 28 Rozměry při lemování [41].

3.2.1 Přímý lem

Lze jej také označovat jako rovinný lem. U tohoto typu lemu vzniká při tváření jednoosá deformace. Celá výrobní operace je velmi jednoduchá a dá se označit za ohýbání po přímce. Namáhání v obvodovém směru je nulové. Přímý lem je ovlivněn zejména tloušťkou plechu a poloměrem ohybu. Na obr. 29 jsou uvedeny geometrické parametry přímého lemu. [1, 3, 41]



Obr. 29 Přímý lem [41].

U metody tváření nepevným nástrojem je vztah pro výpočet potřebné vnější ohýbací síly složen ze součinu tlaku, šířky lemu a délky volného konce. Poslední proměnná se po zatížení zmenšuje, a to v závislosti na rostoucím úhlu ohybu. Pokud se zmíněný parametr před ukončením tvářecí operace přespříliš zredukuje, může díky tomu dojít ke snížení ohybového momentu od ohýbací síly pod kritickou hodnotu. Tímto způsobem by byl vytvořen nedolisovaný lem. Právě proto je rovnice pro výpočet měrného tlaku, jenž je potřebný k vytvoření daného lemu, odvozena z momentové rovnováhy vnějších a vnitřních sil. [1, 3, 41] Její odvození a výsledný tvar vypadá takto:

- Vnější ohybová síla

$$F_o = p \cdot a \cdot b \quad (3.4)$$

- Ohybový moment vnějších sil

$$M_v = F_o \cdot \frac{a}{2} = p \cdot a^2 \cdot b \quad (3.5)$$

- Ohybový moment vnitřních sil

$$M_{vn} = 2 \cdot \int_0^{t/2} \bar{\sigma} \cdot b \cdot a \cdot da, \quad (3.6)$$

kde: $\bar{\sigma}$ - skutečné napětí [MPa].

- Působící tlak z momentové rovnováhy

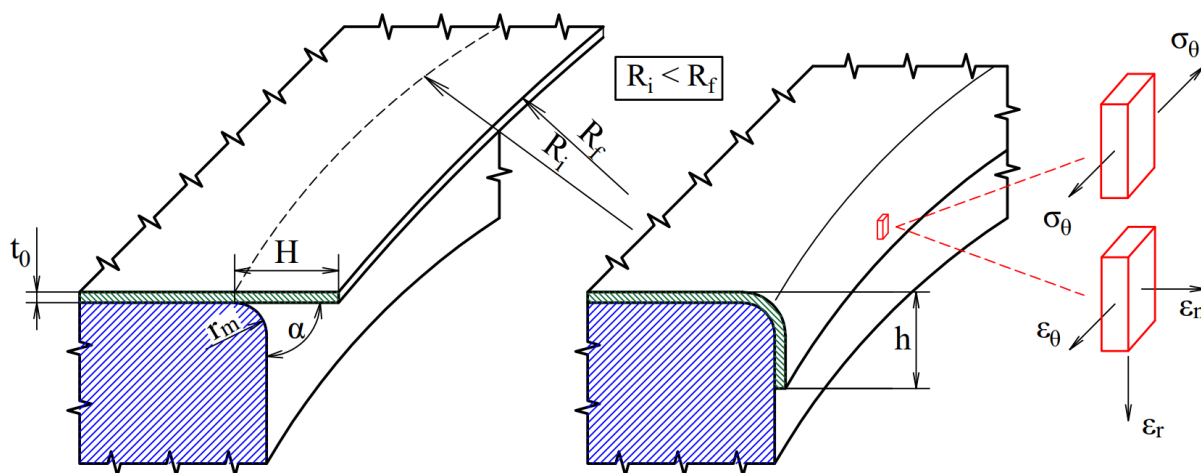
$$p_1 = \frac{4 \cdot r_l^2 \cdot K \cdot \left(\frac{t_0}{2 \cdot r_s}\right)^{n+2}}{(n+2) \cdot a^2}, \quad (3.7)$$

kde: K - materiálová konstanta [MPa],

n - exponent deformačního zpevnění [-].

3.2.2 Vydutý lem

Jinak také možno tento typ nazývat konvexní. Při výrobě je vytvářeno tahové napětí podél hrany lemu. Účinkem tohoto napětí se tloušťka plechu postupně zmenšuje. Pokud by došlo k překročení kritické hodnoty poměrného přetvoření tloušťky materiálu způsobené tímto vlivem, dojde k vytvoření trhlin na hraně lemované součásti. Schéma vydutého lemu je znázorněno na obr. 30. [1, 3, 41]



Obr. 30 Vydutý lem [41].

Hlavními proměnnými, jež ovlivňují výrobní proces, jsou tloušťka plechu, poloměr vybrání, požadované přetvoření a materiálové charakteristiky. Měrný tlak od tvářecího média má v tomto případě vliv pouze na dolisování výsledného tvaru. Proto je vhodná kontrola hodnoty tečného přetvoření a v případě blízkém se ke kritické hodnotě provést výrobu na více operací s případným provedením vhodného tepelného zpracování. [1, 3, 41] Potřebný tlak pro výrobu se tedy získá složením dvou částí rovnice. []:

$$p_c = p_1 + p_{2vd}, \quad (3.8)$$

kde: p_1 - tlak související s výrobou přímého lemu [Pa], vztah (3.7),
 p_{2vd} - tlak související s výrobou vydutého lemu [Pa], ze vzorce:

$$p_{2vd} = \frac{K \cdot t_0}{R_f} \cdot \left(\frac{H}{R_i}\right)^n \cdot \left(1 - \frac{H}{2 \cdot R_i}\right), \quad (3.9)$$

kde: H - rozvinutá výška lemu [mm],
 R_f - konečný poloměr [mm],
 R_i - výchozí poloměr [mm].

Mírným zjednodušením lze také určit poloměr, který je vhodné vyrobit na plechový polotovár před tvářením. Spočívá v předpokladu anizotropního materiálu a zanedbání vzájemného tření mezi polotovarem a matricí. [1, 3, 41] Následně lze tento poloměr vypočítat [41]:

$$R_p = R_L - y, \quad (3.10)$$

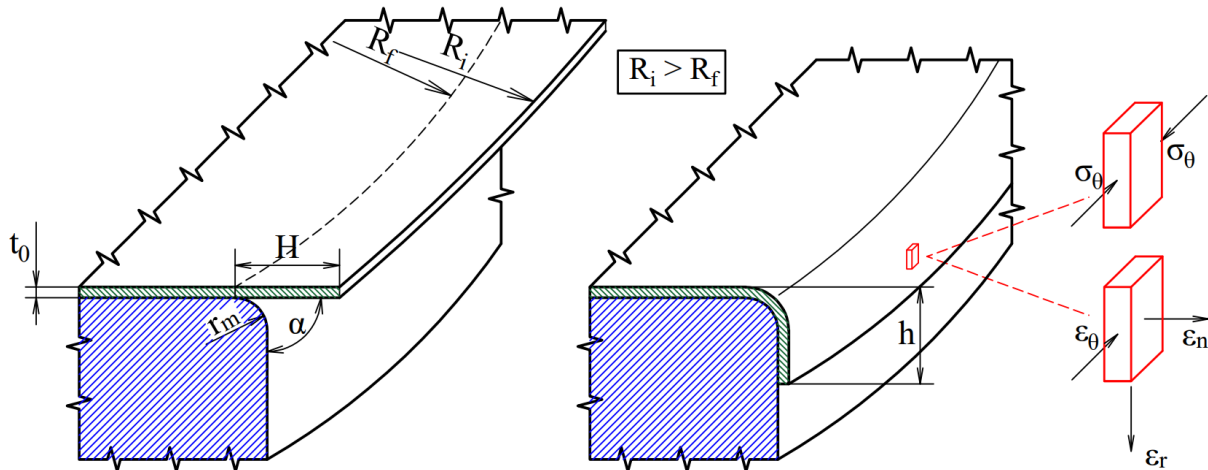
kde: R_L - poloměr lemování [mm],
 y - délka neutrální plochy před lemováním [mm], ze vzorce:

$$y = r + \sqrt{r^2 - 2 \cdot R_L \cdot L_n}, \quad (3.11)$$

kde: r - poloměr zakřivení neutrální plochy [mm],
 L_n - délka neutrální plochy po lemování [mm].

3.2.3 Vypuklý lem

Tento druh se dá označit jako konkávní. Tlakovým namáháním, jež je při této operaci vytvářeno, dojde k enormnímu hromadění materiálu. Po překročení maximální možné hodnoty deformace dochází na vnitřním okraji plechového polotovaru ke vzniku vln. Jinak lze tento jev také nazvat zvrásnění nebo zvlnění. Naopak na vnějším okraji poloměru ohybu se vyskytuje tahové napětí. Právě proto může dojít na vnější části k popraskání. Náčrt principu výroby tohoto typu lemu a jeho geometrie je vidět na obr. 31. [1, 3, 41]



Obr. 31 Vypuklý lem [41].

Mezi parametry ovlivňující vytváření tvaru lze zařadit poloměr, délku a úhel ohybu. Geometrické charakteristiky jsou však omezeny hodnotou maximální deformace, která je závislá na tloušťce polotovaru, materiálových vlastnostech a druhu výroby. Zmínované zvlnění je pokládáno za nejpravděpodobnější vadu vzniklou při tváření vydatého lemu. Lze mu však zabránit omezením délky přesahu nebo zvětšením tloušťky. Tím je docíleno snadnějších interakcí vazeb v materiálu. [1, 3, 41] Potřebný tlak pro vytváření se opět získá složením dvou částí rovnice. []:

$$p_c = p_1 + p_{2vp}, \quad (3.12)$$

kde: p_{2vp} - tlak související s výrobou vypuklého lemu [Pa], ze vzorce:

$$p_{2vp} = \frac{K \cdot t_0}{R_f} \cdot \left(\frac{H}{R_i} \right)^n \cdot \left(1 + \frac{H}{2 \cdot R_i} \right). \quad (3.13)$$

Stejně jako u vydatého lemu je možné spočítat poloměr výchozího polotovaru. Je však nutné dodržet totožné zjednodušení, a to v předpokladu anizotropního materiálu a opomenutí vzájemného tření mezi plechovým polotovarem a lisovníkem. Délka lemu v tomto případě proto musí být krátká v porovnání s poloměrem obvodového zakřivení. Pokud by to tak nebylo, změnilo by se zakřivení v radiálním směru, tím by došlo k porušení podmínky prosté napjatosti. Díky shrnutí všech výše zmíněných okolností lze posléze požadovaný poloměr vypočítat ze vztahu [41]:

$$R_p = R_L + y, \quad (3.14)$$

$$\text{kde: } y = -r + \sqrt{r^2 - 2 \cdot R_L \cdot L_n}. \quad (3.15)$$

3.3 Mezní tvářitelnost

Mezní tvářitelnost je parametr, který určuje maximální rozměr vyráběné součásti. Platí pro daný materiál, vytvářenou geometrii a použitou výrobní technologii. V praxi je určován pomocí diagramů vyjadřujících mezní stupně přetvoření, zkráceně DMSP. [41, 44, 46]

V těchto diagramech je určena přibližná hranice, jež dělí vyráběné dílce na ty, které jsou vyrobitelné bez vzniku defektů a ty, které nelze vyrobit, aniž by u nich nevznikl určitý druh problému. Díky nim lze rychle určovat technologickou tvářitelnost. Většinou je souřadný systém tvořen poměry hlavních geometrických rozměrů v logaritmických souřadnicích. [41, 44, 46]

Křivky vykreslované do DMSP nejčastěji znázorňují hranice, kde dochází ke vzniku trhlin. Do komplexnějších diagramů je zaneseno větší množství mezních křivek, jež vystihují např. začátek tvorby zvlnění, hranici nedokonalého dotvarování dílu atd. Je proto důležité v takovém případě zohlednit všechny okolnosti, které mohou vzniknout během výrobního procesu. [41, 44, 46]

Mezi takové grafy lze zařadit diagramy Woodova typu. Ty jsou stanoveny pro výrobu lemů při využití technologie nepevného nástroje. Přibližný diagram pro výrobu vydutých lemů je znázorněn na obr. 32. Jsou zde vykresleny tři mezní křivky, které jsou v logaritmických souřadnicích znázorněny jako přímky. [41, 44, 46] Rovnice popisující jednotlivé křivky tohoto diagramu mají tyto tvary [44]:

- Mez trhlin (přímka I)

$$\log \frac{H}{r_m} = \log C_w + n_w \cdot \log \frac{H}{t}, \quad (3.16)$$

kde: n_w - směrnice přímky plastického zvlnění,
 C_w - parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje.

- Mez nedolisování (přímka II)

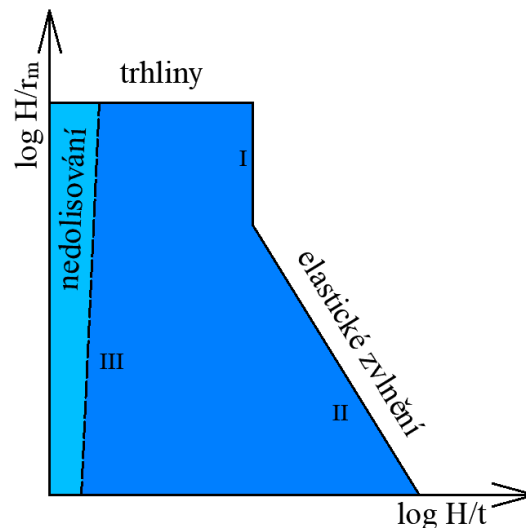
$$\log \frac{H}{r_m} = \log \frac{B_1}{\sigma_k} + 17 \cdot \log \frac{H}{t}, \quad (3.17)$$

kde: B_1 - parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje.

- Mez elastického zvlnění (přímka III)

$$\log \frac{H}{r_m} = \log \frac{B_2 \cdot E}{\sigma_k} - 2 \cdot \log \frac{H}{t}, \quad (3.18)$$

kde: B_2 - parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje,
 E - modul pružnosti v tahu (Youngův modul) [MPa].

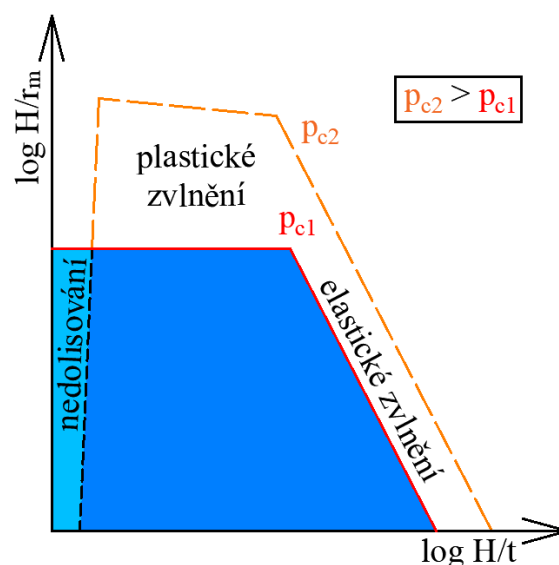


Obr. 32 Diagram Woodova typu pro vydutý lem [44].

V tomto diagramu přímka (I) znázorňující mez trhlín přechází při přesně odvoditelném poměru H/t v přímku (II), jenž vyznačuje hranici vzniku trvalých vln na tvářeném dílci. Zmíněná hranice se poté chová konstantně bez vlivu na poměru H/t . Přetrvává však závislost na funkci poměru E/σ_k . Po překročení kritické hodnoty dojde k radikálnímu nárůstu potřebné tlakové síly. Tímto navýšením dojde při tváření k tvorbě trhlín. [41, 44, 46]

Oblast dobrých výlisků, označená tmavě modrou barvou, je ohraničená zkonstruovanými přímkami. Zvýšení měrného tlaku nemá vliv na pozici přímky vzniku trhlín. Jedná se totiž o kritickou přímku, na kterou působí především konstanty tvářeného materiálu. Dojde však k posunu přímek (II) a (III) směrem do stran. Účinkem zmíněného pohybu je rozšíření pásma dobrých výlisků. [41, 44, 46]

Při výrobní operaci, při které je vyráběn vypuklý lem je ve stěně lemu tlaková složka napjatosti. Ta způsobuje hromadění materiálu s následnou ztrátou stability a vytvořením vln. Vznik zvrásnění může být potlačen případným zvýšením měrného tlaku nástroje. Na obr. 33 je zřejmý diagram Woodova typu. Je z něj patrné zvětšení pole dobrých výlisků při zvětšování měrného tlaku. [41, 44, 46]



Obr. 33 Diagram Woodova typu pro vypuklý lem [44].

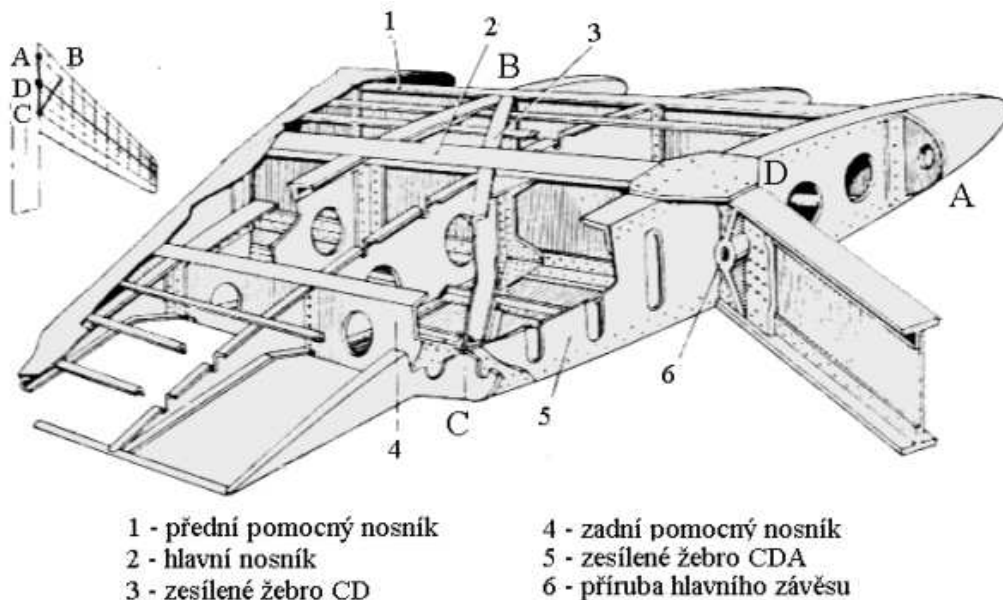
4 MATERIÁL D16

Jak bylo zmíněno v kapitole 1, zadaná součást se bude vyrábět z materiálu D16. Jedná se o konstrukční hliníkovou slitinu s vysokými hodnotami statických mechanických vlastností, dobrou houževnatostí a nízkou odolností proti korozi v přirozeném stavu. Tepelným zpracováním lze docílit zvýšení odolnosti proti korozi i zvýšit mechanické vlastnosti na úkor snížení houževnatosti. Maximální provozní teplota je okolo 150 °C a za určitých podmínek je vhodná ke svařování. Slitina je vhodná pro tváření za studena i za tepla, při dodržení správných podmínek procesu. Dle nejznámějších používaných norem jsou materiálové ekvivalenty vypsány v Tab. 7. [8, 47]

Tab. 7 Materiálové ekvivalenty materiálu D16 [48]

ČSN	EN	ISO	AFNOR	ÚNI	JIS
					
42 4203	Al-P2024	AlCu4Mg1	2024	P-AlCu4 .4MgMn	2024
DIN	PN	ONORM	GOST	BS	AISI/SAE
					
AlCuMg2	AlCu4Mg2	AlCuMg2	D16	2024	2024

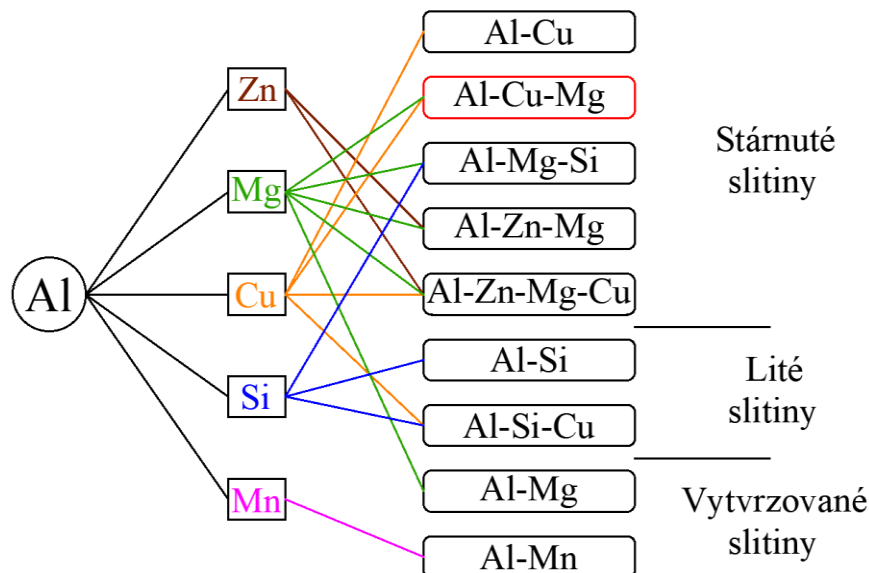
Používá se na středně a silně namáhané součásti, u nichž se požaduje zvýšená životnost při proměnném namáhání nebo pod vlivem krátkodobě zvýšené teploty. Uplatnění nachází především v leteckém průmyslu (potahy, přepážky, žebra, stojiny, nosníky, táhla řízení, díly nosného systému, panely), obr. 34. Dále pak pro kolejová vozidla, automobily a jiné dopravní prostředky, nebo i ve stavebnictví. [8, 47]



Obr. 34 Řez křídlem [49].

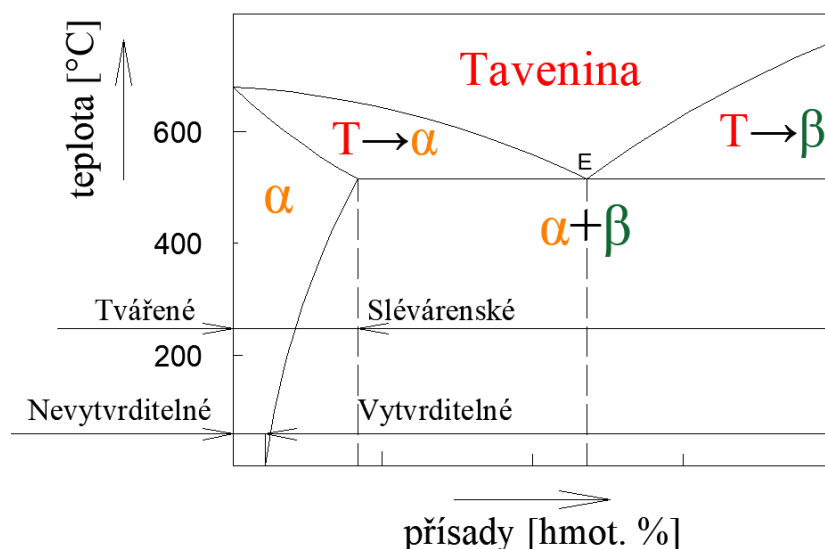
4.1 Zařazení materiálu D16

Slitiny Al-Cu-Mg jinak také nazývané duraly lze zařadit mezi nejstarší a nejpoužívanější vytvrditelné slitiny hliníku, obr. 35. Prošly značným rozvojem od binárních slitin Al-Cu až ke složitým komplexním slitinám. Měď je totiž jeden z nejdůležitějších prvků vyskytující se ve slitinách hliníku. Vytváří společně s hliníkem tvrdé intermetalické fáze CuAl_2 , které zvyšují tvrdost a pevnost. Bohužel snižují odolnost vůči korozi a tažnost. Měď také výrazně zlepšuje obrobiteľnosť a umožňuje vytvrzování. Maximální obsah mědi se obvykle pohybuje do 4,8%, ale výsledné mechanické vlastnosti závisí také na obsahu dalších prvků, hořčíku (0,4 - 1,8 %) a manganu do 1%. [8, 47]



Obr. 35 Přehled typů slitin hliníku [50].

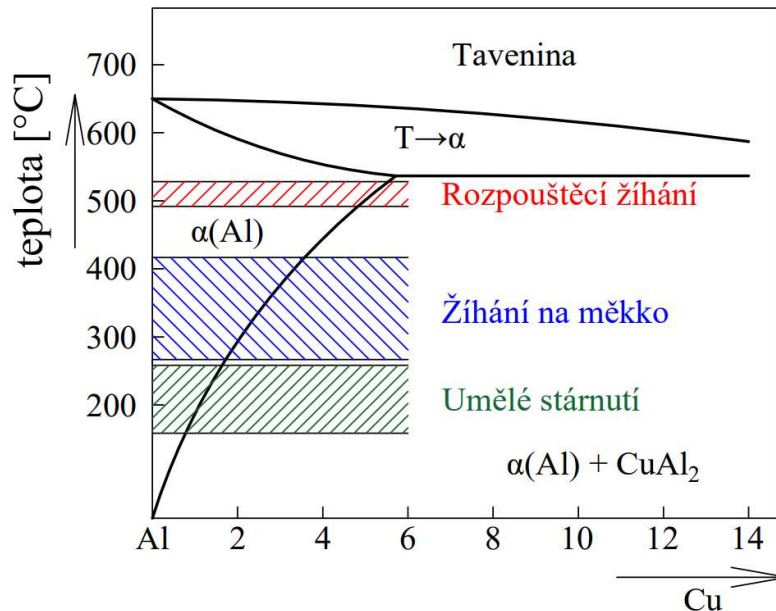
Duralové slitiny mohou za ideálních podmínek dosahovat pevnosti až $R_m = 530 \text{ MPa}$. Vytvrzování probíhá převážně přirozeným stárnutím na vzduchu po rozpouštěcím žíhání při teplotě $490 - 520^\circ\text{C}$. Materiál D16 lze dle používaných kritérií pro dělení hliníkových slitin tedy zařadit do skupiny tvářených vytvrditelných slitin, viz obr. 36. [8, 47, 50]



Obr. 36 Zařazení slitin hliníku [51].

4.2 Vliv TPZ na proces tváření plošných dílců z materiálu D16

Převážným důvodem provádění tepelného zpracování je zvýšení mechanických vlastností, snížení vnitřního pnutí nebo případná změna struktury slitin. Mnohdy se však využívá ke zlepšení technologických vlastností nebo eventuální změně odolnosti proti korozi. Tepelná úprava materiálu je také výrazně závislá na chemickém složení. Nezanedbatelnou roli má i struktura nebo schopnost vytvrzení. Nejpoužívanější druhy tepelných zpracování je možné vidět na obr. 37. [8, 47, 50, 51]



Obr. 37 Druhy TZ [50].

Zároveň je důležité dodržet relativně úzkou teplotní toleranci během celého procesu tepelného zpracování. Musí být přísně dodržena, aby nedošlo k znehodnocení požadovaných vlastností. Proto se pro tepelné zpracování používají pece s přesnou regulací a rovnoměrným působením teploty po celém vnitřním prostoru pece. [8, 47, 50, 51]

Pro lisování dílců se v převážné míře používá válcovaný plech. Pokud je přetvoření během operace malé, lze použít tepelně nezpracovaný plech. Naopak, když je přetvoření velké nebo je geometrie vyráběného dílce příliš složitá, je vhodné plech před tvářením vyžít pro zlepšení potřebných mechanických vlastností. Díky tomu se zamezí vzniku možných vad. Druhy zkratk pro označování tepelného zpracování materiálu D16 jsou uvedeny v Tab. 8. [8, 47, 50, 51]

Tab. 8 Vysvětlivky značení TZ materiálu D16 [8].

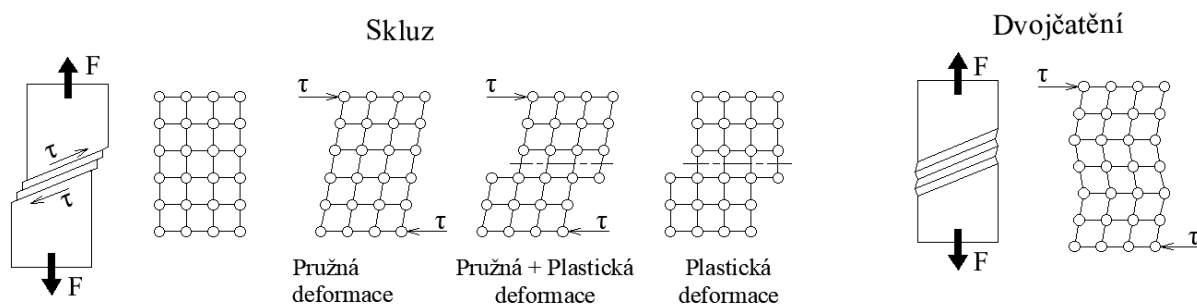
Č	Čistý
A	Plátovaný
M	Měkký
V	Potahová jakost
T	Po rozpouštěcím žíhání a přirozeném stárnutí
T1	Po rozpouštěcím žíhání a umělém stárnutí

Z výše uvedeného je patrné, že nejlepších výsledků lze dosáhnout vhodnou kombinací tváření a tepelného zpracování. Dá se tak dosáhnout maximálních užitečných vlastností materiálu, za předpokladu vhodně zvoleného technologického postupu výroby.

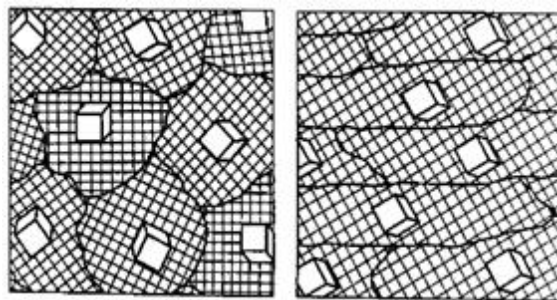
4.2.1 Deformační zpevnění materiálu

Při samotném tváření dílce se zvyšuje pevnost, tvrdost a mez kluzu. Pokud dosáhne hodnota vnitřního napětí hodnoty pevnosti v tahu, materiál by překročil kritickou hodnotu a již není vhodné ho dále tvářet. Mohlo by totiž dojít ke vzniku trhlin a jiných vad v závislosti na typu operace a vyráběném tvaru. Deformační zpevnění se projevuje narůstajícím odporem materiálu proti přetvoření. Je to zapříčiněno zvyšující se hustotou dislokací a z toho vyplývající omezenou plasticitou. [52, 53, 54, 55]

Způsobuje ho plastická deformace za studena, tzn. za teploty nižší, než je teplota rekrytalizace materiálu. Při tomto pochodu dochází ke skluzům a vzniku nových dislokací, obr. 38. Zdrojem, jenž tyto procesy způsobuje, je působení smykových napětí. Výsledné zpevnění závisí zejména na vnitřním uspořádání a velikosti atomů materiálu. Schéma změny tvaru vnitřního uspořádání po tváření je zřejmé z obr. 39. [52, 53, 54, 55, 56]



Obr. 38 Typy pohybu dislokací [54].



Obr. 39 Změna tvaru zrn [55].

Je ovlivnitelné během tvářecích operací. Kritické skluzové napětí je totiž ovlivněno teplotou a deformační rychlostí. Zpevnění u heterogenních materiálů, tvořených více fázemi, může probíhat více různými mechanismy. [52, 53, 54, 55, 57] Jedná se o postupné hromadění dislokací, to způsobuje růst napětí, které lze vyjádřit vztahem [56]:

$$\tau = \alpha \cdot G \cdot b_v \cdot \sqrt{\rho_d}, \quad (4.1)$$

kde: α - faktor interakce dislokací [-],
 G - modul pružnosti ve smyku [MPa],
 b_v - velikost Burgersova vektoru [-],
 ρ_d - hustota dislokací [cm^{-2}].

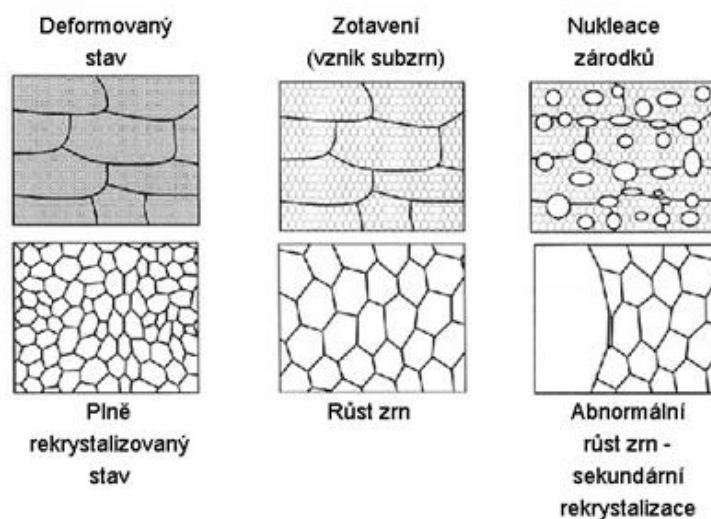
Proto je povětšinou tváření proces víceoperační. Míní se tím postup obsahující několik tvarování s mezioperačními tepelnými zpracováními. Usiluje se tím o snížení zpevnění. Redukce může být úplná, to znamená úplné odstranění vlivu zpevnění. Případně, pokud to bude dostačující pokles na hodnotu, která bude vhodná pro další operaci. Nejčastěji používaným tepelným zpracováním je v těchto případech normalizační žíhání. Právě díky uskutečnění procesu se v materiálu obnoví požadovaná struktura a je možno s dílcem dále pracovat. [47, 52, 53]

4.2.2 Tepelné zpracování

Zpevnění vzniklé při tváření se následně může odstranit vhodným tepelným zpracováním. Dojde k rekrytalizaci kovu a odstranění vlivu tváření za studena. Tento proces lze také nazvat odpevňování. Principem je tepelně aktivované přerozdělení a snížení hustoty dislokací a vakancí v materiálu. Tento jev má difuzní charakter. Materiál má vlastnost, že rekrytalizuje čím rychleji, čím více byl při tváření za studena zpevněn. Nejpoužívanější tepelná zpracování jsou: [47, 54]

- Homogenizační žíhání – provádí se za vysoké teploty nad křivkou rozpustnosti, je tak dosaženo snížení chemické heterogenity pomocí vnitřních difuzních procesů.
- Rekrytalizační žíhání – používá se ke zlepšení tvářitelnosti po tvářecích operacích za studena.
- Žíhání s částečnou rekrytalizací – jedná se o rekrytalizační žíhání ve zkráceném čase a je tak docíleno zachování části tvářené struktury v materiálu i po provedení tepelného zpracování.
- Opakované TZ – je používáno kvůli nedostatečným vlastnostem po provedení prvního tepelného zpracování. Může se také jednat o provozní tepelné zpracování, které zahrnuje velké deformace po tvářecích operacích nebo nechtěné vystárnutí dílce.

Teplota, doba výdrže, typ a délka ochlazení jsou proměnné a závisí u jednotlivých procesů na více faktorech. Jedná se především o chemické složení materiálu, rozměry vyráběného dílce a jeho předchozí zpracování. Následně musí dojít k rychlému uschování do chladicího boxu, neboť by mohlo dojít k postupnému přirozenému vystárnutí a ztrátě vytvořených vlastností. Postupy odpevňování lze rozdělit na zotavení, rekrytalizaci a růst zrn, obr. 40. Druhým způsobem je koagulace a zpětné rozpouštění precipitátů, které platí pro precipitačně vytvrzené slitiny. [47, 58]



Obr. 40 Schematické znázornění rekrytalizace [58].

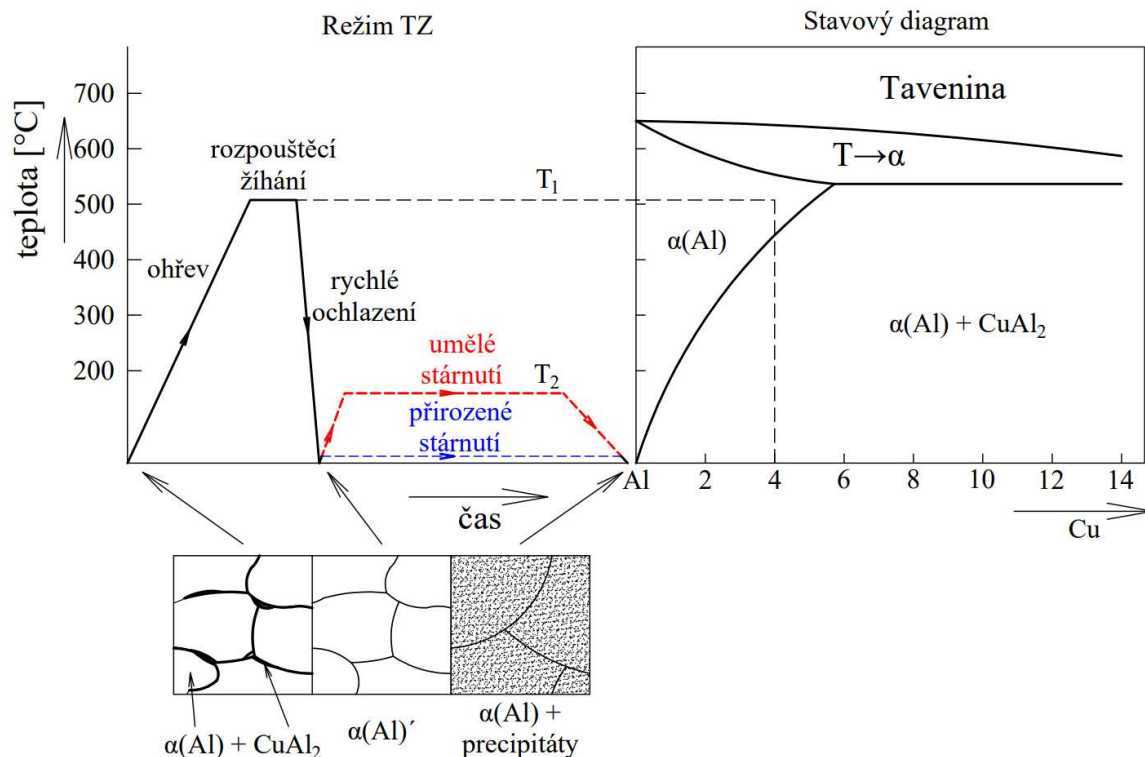
- Zotavení – jinak řečeno změny, které proběhnou v materiálu před rekrytalizací. Přesněji jde o polygonizaci neboli přeuspořádání dislokací, anihilace jinak řečeno zánik dislokací opačného znaménka. Je tím docílen vznik míst v mřížce s nižší deformační energií, než má okolí.
- Rekrytalizace primární – je proces vzniku a rychlého růstu subzrn, až do kritického nárůstu úhlů mezi nimi. Následně spojování s dalšími, jež mají podobnou nebo stejnou mřížku a vznik nového subzrna odděleného od ostatních hranic s velkým úhlem. Tím je docílen vznik nových zrn s nízkou hustotou dislokací.

- Růst zrn – je způsoben dalším snížením energie zmenšením úhrnné plochy. Řídí jej povrchové napětí. Při ponechání na teplotě žíhání by mohlo dojít k sekundární rekrytalizaci, která je většinou nežádoucí. Jiným mechanismem dalšího růstu je kritické zpracování, kde jsou kritické hodnoty deformace a teploty žíhání.
- Koagulace – platí pro precipitačně vytvrzené slitiny. Při nižší teplotě shlukování precipitátu a přestárnutí a po dalším zvýšení teploty rozpuštění precipitátu v základní matici.

Po ukončení všech operací, tedy dokončení výsledného tvaru dílce, může být také použito tepelné zpracování. Dosáhne se zlepšení konečných mechanických vlastností a rovnoměrnější struktury. Dílec dostane výslednou pevnost a houževnatost a je dále poslán k dalšímu zpracování nebo montáži. [47, 58]

4.2.3 Precipitační zpevnění

Nejrozšířenější metodou tepelného zpracování slitin hliníku je vytvrzování. Jeho cílem je zpětné rozpuštění intermetalických fází do tuhého roztoku $\alpha(\text{Al})$ a následné vyloučení těchto fází do struktury, které způsobí zpevnění slitiny. Celý tento proces se skládá z několika částí, viz obr. 41. [47, 51]

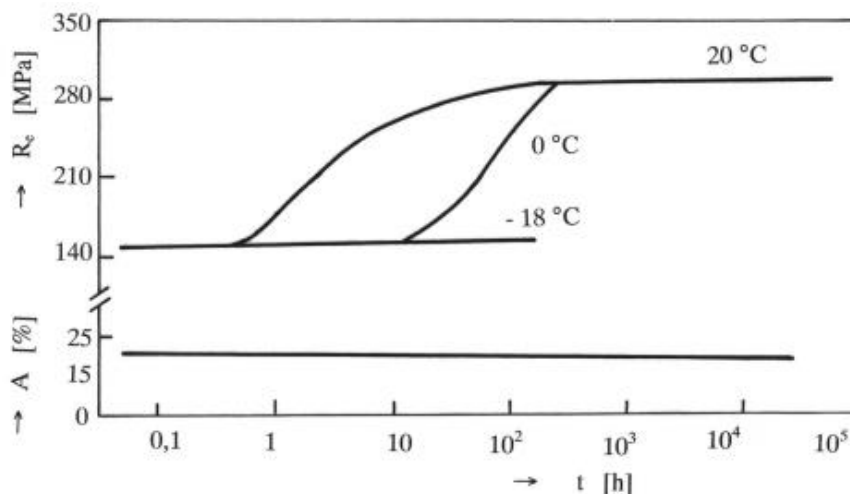


Obr. 41 Schéma postupu zpevnění [51].

Podmínkou procesu je změna rozpustnosti a vytvoření přesyceného tuhého roztoku v materiálu. Splněním tohoto předpokladu je možný následný precipitační rozpad neboli stárnutí. Jedná se o přirozenou vlastnost materiálu, kterou lze pouze zpomalit. Dá se to uskutečnit zmražením dílce na odpovídající teplotu pod bodem mrazu. Různé slitiny mají různou teplotu, při které dochází k tomuto jevu. U Al-Cu-Mg slitin dochází ke vytvrzování již při pokojové teplotě. Naopak například u slitin na bázi Al-Zn-Mg je nutné zvýšení teploty a tento jev je označován jako umělé stárnutí. Fakta o vlivu teploty na stárnutí: [47, 51, 58]

- čím je vyšší teplota, tím dříve se dosáhne maximální pevnosti při této konstantní teplotě,
- čím je nižší teplota, tím později se dosáhne maximální pevnosti při této konstantní teplotě,
- čím je vyšší teplota, tím je maximálně dosažitelná pevnost nižší.

Pomocí stárnutí lze získat maximální možné mechanické vlastnosti, které jsou pro každou slitinu charakteristické. Čas, který je potřebný pro realizaci rozpadu přesyceného tuhého roztoku závisí především na chemickém složení materiálu. Po celou dobu, od okamžiku získání přesyceného tuhého roztoku, až po získání výsledných mechanických vlastností, v materiálu probíhají nepřetržitě substrukturní změny. Za následek to má neustálou přeměnu mechanických, fyzikálních, korozních i technologických vlastností. Souhrn permanentních změn vytvořených tímto způsobem se nazývá kinetikou rozpadu, obr. 42. [47, 58]



Obr. 42 Kinetika rozpadu prosyceného tuhého roztoku u slitiny EN AW 2024 [47].

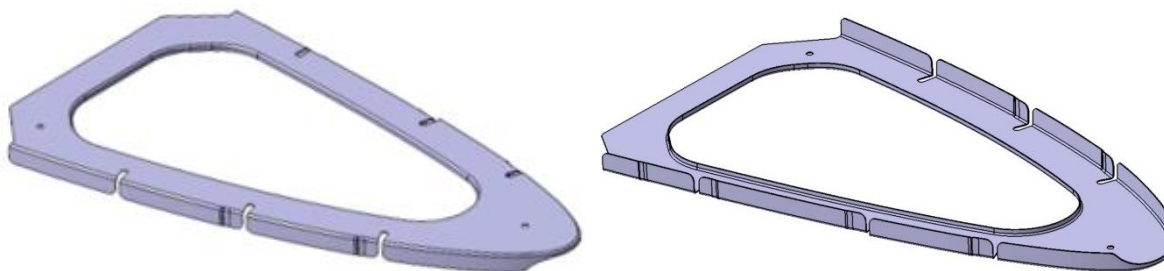
Ze znázorněného grafu se dají vyvodit důležité závěry, které obecně platí pro všechny slitiny typu Al-Cu-Mg. Nejdůležitějšími jsou potřebný čas pro vytvrzení a získání požadovaných vlastností. Dále je patrný vývoj mechanických vlastností v čase. Vše v závislosti na teplotě, během které proces probíhá. Výčet nejdůležitějších poznatků může být: [47, 58]

- při záporné teplotě téměř nedochází k rozpadu přesyceného tuhého roztoku,
- při teplotě okolo 0 °C je rozpad přibržděn,
- při normální teplotě je proces ukončen zhruba po třech dnech,
- plastické vlastnosti se skoro nemění.

Sdružením operací tváření a tepelného zpracování lze docílit zjemnění zrna. Důvodem, proč je snaha o redukci velikosti zrn ve struktuře je prostý. Čím menší bude velikost zrna v materiálu u hotového tvářeného výrobku, tím lepší budou jeho pevnostní i plastické vlastnosti. Sníží se rozdílnost mechanických vlastností v různých místech dílce neboli anizotropie. Z tohoto pohledu je tváření výjimečně efektivní a v kombinaci s vhodnou metodou tepelného zpracování nenahraditelnou technologií. [47, 58]

5 NÁVRH ŘEŠENÍ

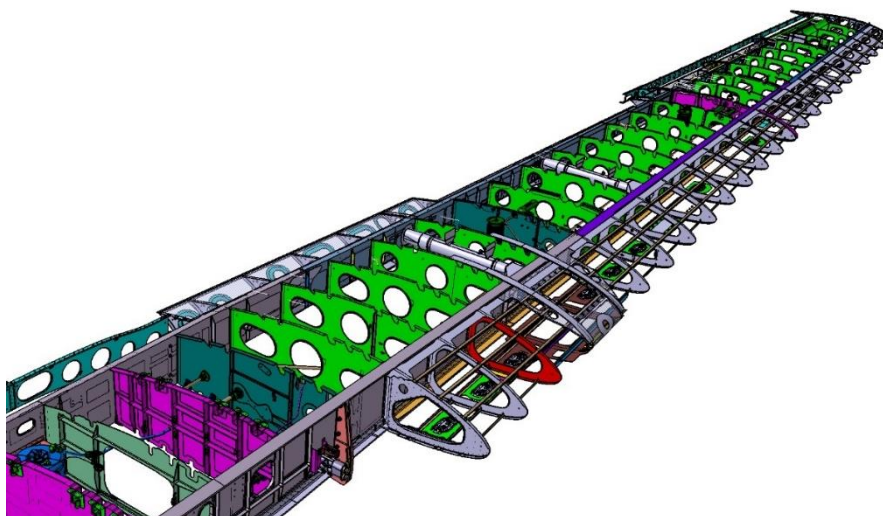
Vyráběnou součástí je žebro náběžné hrany křídla letounu, obr. 43. Produkováno je z plechu o tloušťce 0,8 mm lisováním. Materiálem používaným pro zhotovení je D16č AM, který po provedení celého procesu výroby má výsledné označení D16č AT. [8, 59, 60]



Obr. 43 Náběžné žebro

Dle tvaru, funkce, zatížení, umístění a typu konstrukce lze tento dílec přesněji zařadit do skupiny náběžných plnostěnných žebor s konstrukčním otvorem a výřezy na podélné výztuhy. Lemy zhotovené po obvodu součásti i otvoru plní funkci vyztužení a brání ztrátě vzpěrné stability. Vnější lemy také slouží pro následné začlenění do sestavy. Vyrobený otvor je na žeboru z několika důvodů. Hlavním je snížení hmotnosti celé konstrukce křídla. Dále pak umožňuje lepší přístup při sestavování. Můžou jí být také vedeny elektrické, hydraulické nebo palivové rozvody. [60, 61]

Přesné umístění žebra v sestavě křídla je patrné z obr. 44. Nachází se mezi trupem a zavěšením motoru. I proto musí splňovat vyráběný dílec ty nejvyšší požadavky na geometrickou přesnost a výsledné mechanické vlastnosti. [60, 61]



Obr. 44 Umístění žebra

Náběžná žebra lze zařadit mezi základní prvky konstrukce letounu. Tvoří základní nosný systém u křidel a ocasních ploch. Jejich nejdůležitější funkcí je zajistit konečnou geometrii profilu křídla. Dále pak zachycovat zatížení a rozvádět je do hlavní konstrukce. Také plní úlohu rozdělení vnitřních prostor a vyztužení okolí otvorů zhotovených v křídle. Při montáži je žebro po celé délce vnějších lemů připevněno k potahu, ke stojinám a podélným výztuhám. Je tomu tak z důvodu zamezení vzniku vibrací jednotlivých částí. [60, 61]

5.1 Analýza výroby

Základem tvářecího procesu je správná příprava plechového polotovaru, tzv rozvinu. Nesmí se na něm vyskytovat vrypy, praskliny a další možné vady. I proto je plech před frézováním požadovaného tvaru rozvinu zkontrolován a až posléze je vyráběna požadovaná geometrie.

Na pracovním stole frézky jsou plechy naskládány na sebe a nahoru přiložen krycí plech. Následně jsou provrtány a přišroubovány ke stolu, aby došlo k zamezení pohybu po stole. Poté stůl vjede do pracovního prostoru stroje, viz obr. 45, kde proběhne samotné frézování. Frézovací hlava má vlastní odsávání a je přitlačena na překrývací plech, na kterém zanechává rýhy a otisky, viz obr. 46. Tím je dosažena vyšší přesnost výroby. Pro frézování výchozího tvaru plechového rozvinu firma používá stroj Creno AERO. Jedná se o tříosou CNC horní frézku s vakuovou hlavou. []

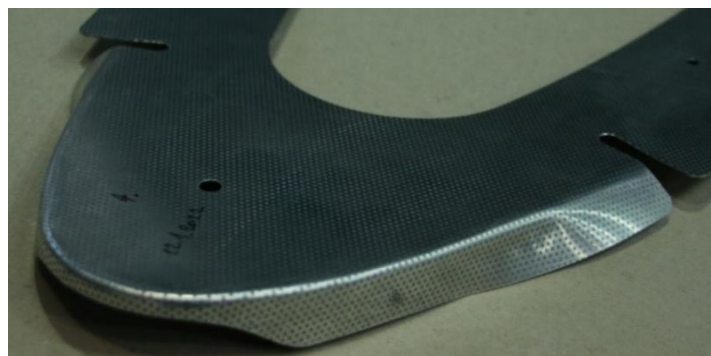


Obr. 45 Pracovní prostor Creno



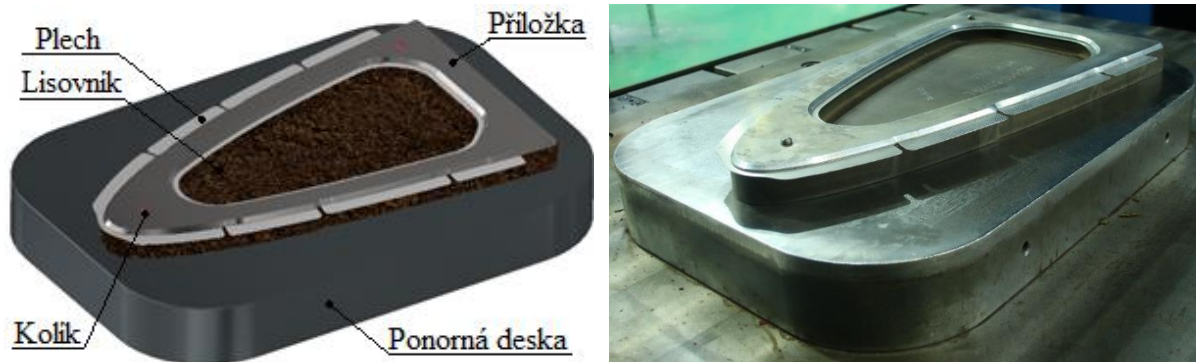
Obr. 46 Krycí plech

Po vyfrézování dojde k odjehlení a začištění celého polotovaru. Opětovně je provedena kontrola, zda nedošlo při operaci ke vzniku záseků, zátrhů nebo jiných nedostatků. Pokud je polotovar shledán vyhovujícím, pokračuje na očištění a odmaštění. Jako kritické místo výrobního procesu tohoto typu žebra lze označit tvarování nosové části. Vzniká zde velké zvlnění a v horších případech i překlady. Je proto nutné před tvářením předchystat geometrii polotovaru, aby nedocházelo ke vzniku těchto problémů. Proto je dalším krokem připravení nosové části žebra, viz obr. 47. Plechový polotovar je ustaven pomocí kolíků na lisovník a pracovník pomocí paliček vyklepe a případně postahuje požadovaný tvar.



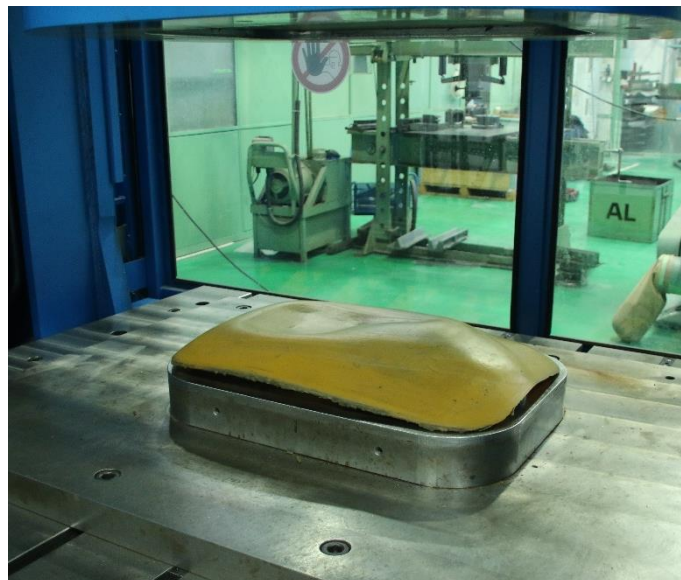
Obr. 47 Předklepání nosové části dílce.

Po přípravě všech polotovarů již následuje lisování. Předklepaný plech je umístěn mezi lisovník a příložku a je vymezen kolíky proti pohybu. Poté je takto složená sestava přenesena do pracovního prostoru lisu a položena na ponornou desku. Konfigurace na obr. 48 je přichystána s použitím nepředchystaného plechového polotovaru.



Obr. 48 Rozložení před lisováním.

Pracovník co nejvíce vystředí lisovník s polotovarem na desce a pokračuje volbou příslušného programu s parametry tváření. Po výběru a nastavení parametrů je přiložena krycí guma, viz obr. 49, a je provedena opětovná kontrola umístění a správného složení.



Obr. 49 Použití překrývací gumy.

Po provedení prvního lisování je u dílce patrné, že v nosové části i v části vnějších lemu došlo ke vzniku typické chyby charakteristické pro tváření vypuklého lemu. To je patrné z obr. 50. Přesněji se jedná o zvlnění vzniklé nahromaděním materiálu.

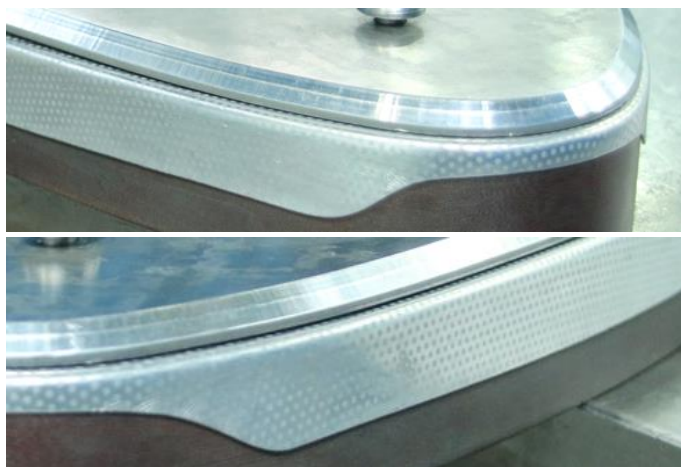


Obr. 50 Dílec po prvním lisování.

Další tváření již není možné, vzhledem k vyčerpání plasticity. Provedením další operace by mohlo dojít k popraskání a tím znehodnocení. Žebro je proto svázáno pomocí drátu se vzorky pro trhací zkoušky a převezeno k provedení tepelného zpracování. Jedná se o rozpouštěcí žihání, které má za cíl obnovení vhodných mechanických vlastností. Po tomto zpracování je nutno žebro ihned zpracovat nebo jej uložit do mrazícího boxu. V opačném případě by došlo k přirozenému stárnutí a ztrátě požadovaných vlastností.

Jakmile nastane čas pro další operaci tváření, je vzhledem k pokroucení během tepelného zpracování pracovníkem plechový polotovar přerovnan. Děje se to z důvodu následného ustavení polotovaru na nástroj pomocí kolíků. Tato operace zahrnuje ruční přerovnání a v případě velkého zdeformování použití paliček pro překlepání.

Následuje přerovnání všech dílců v sérii a přenesení k lisu, kde je provedeno přelisování. Dá se říci, že se zopakuje postup přípravy a samotného lisování. Tedy ustavení polotovaru mezi lisovník a příložku, zabezpečení pomocí kolíku, položení překrývací gumy a výběr lisovacích parametrů. Výsledek tohoto přelisování lze pozorovat na obr. 51.



Obr. 51 Dílec po přelisování.

Konečnou operací je úprava tvaru dílce dle šablony. Spočívá v doklepání a postahování případných nedokonalostí. Dále také dokončení výšky lemů, vyúhlování, vypilování, přerovnání a odjehlení. Zjednodušeně se jedná o dokončení dílce dle výkresové dokumentace. Po ukončení těchto úkonů je vyrobené žebro popsáno příslušným číslem a se vzorky k trhacím zkouškám odesláno ke kontrole. Pokud žebro vyhoví je uskladněno a vzorky jsou odeslány k provedení zkoušek. Hotovou nosovou část s otisky po stahování žebra lze vidět na obr. 52.



Obr. 52 Hotová nosová část.

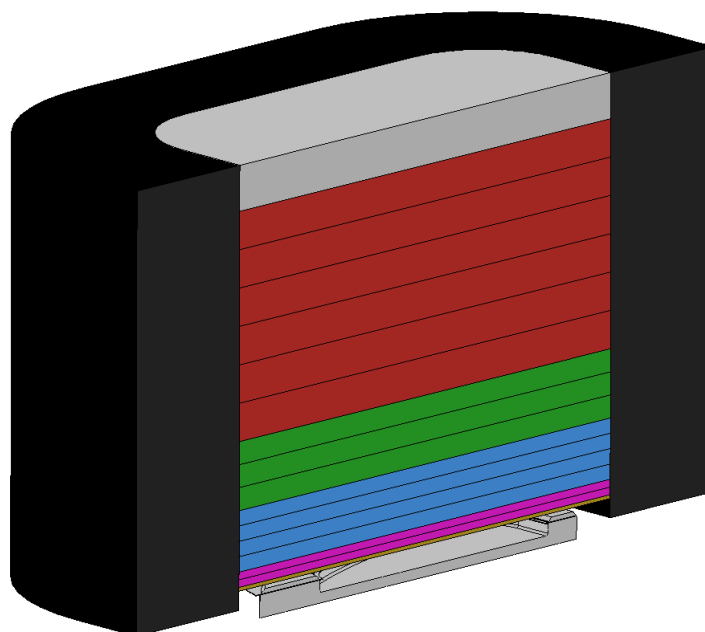
Pro dosažení vyhovujícího výsledku výroby je dílec v nosové části důležité předchystat a poté dvakrát lisovat s mezioperačním tepelným zpracováním pro obnovení mechanických vlastností. Nelze zanedbat i možný vznik vad spojený s přípravou, přenosem, manipulací a dokončením vzhledem k povaze využití dílce. Díky všem těmto vlivům jsou kladeny vysoké nároky na pracovníky jednotlivých pracovišť, především na pracovníka vytvářejícího konečný tvar žebra.

5.1.1 Rozbor polyuretanového lisovníku v návaznosti na tvářecí proces

Vyráběné žebro je aktuálně vyráběno lisováním na lisu PO 630, kterým firma disponuje. Jedná se o metodu guerin, tedy použití nepevného nástroje. V tomto případě se jedná o nepevnou lisovnici označovanou také jako lisovací nádoba nebo kufr lisu. Přesné složení elastomerových desek vychází ze složitosti geometrie a velikostí lisovaných součástí, tvářených materiálů a velikosti nutných tlaků při operacích. Všemi těmito charakteristikami a dlouhodobou zkušeností bylo zvoleno složení kufru PO 630, které je schematicky znázorněno na obr. 53. Parametry, které jsou u desek proměnné jsou jejich tloušťka a počet použitých kusů v kufru. Shrnutí je uvedeno v Tab. 9. [31]

Tab. 9 Složení kufru PO 630 [31].

Počet	Tloušťka
6 desek	50 mm
3 desky	30 mm
4 desky	20 mm
2 desky	10 mm



Obr. 53 Schéma složení kufru PO 630.

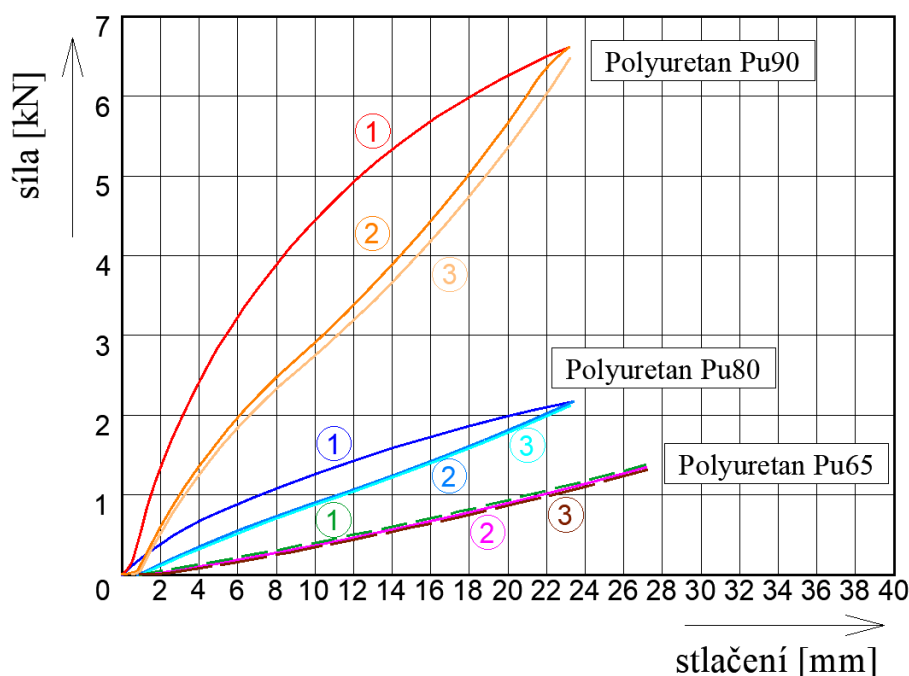
Zmiňované desky jsou z materiálu Polytan 44/65. Mají zdrsňený povrch dotyku s lisovací nádobou a jsou do ní vlepeny. Dále se používají tzv. "překrývací gumy", které jsou umísťovány mezi kufr a nástroj s připraveným plechem. Ty zajišťují delší životnost nástroje a zároveň napomáhají co nejlepšímu výsledku tvářecí operace. Seznam nejpoužívanějších krycích gum je uveden v Tab. 10. Jejich volba závisí zejména na tloušťce plechu, složitosti vyráběného dílce a druhu tvářeného materiálu. [28, 31]

Tab. 10 Seznam používaných krycích gum [28].

Materiál	Tloušťka
Polytan 15/90	5 mm
Polytan 15/80	10 mm
Polytan 44/65	10 mm
Polytan 15/65	15 mm

U průmyslově využívaných elastomerů je také nutné zkoumat jejich chování během a po tvářecích operacích. Mullinsův efekt zkoumá měknutí elastomerů vlivem cyklického zatěžování a díky výzkumu lze následně vytvořit modely pro zkoumané materiály. Tento jev je způsoben postupným mikroskopickým poškozením struktury elastomeru. Proto proběhly experimenty, při kterých byla zjišťována závislost síla-deformace a kdy se průběh křivek ustálí. To je znázorněno na obr. 54, kde proběhla zkouška stlačování válečků z různých tvrdostí polyuretanu. [9]

Diagram pěchovací zkoušky



Obr. 54 Mullinsův efekt [9].

Z diagramu lze vyčíst, že při prvním zatížení je nutno vyvodit vyšší napětí a dále se při následujících zatíženích průběh téměř ztotožní. Největší rozdíly mezi křivkami zatížení nastávají u tvrdších materiálů, a naopak u měkčích materiálů jsou již od prvního zatížení průběhy téměř totožné. Dále lze konstatovat, že s narůstající tvrdostí mají křivky strmější průběhy. [9]

Díky těmto zjištěním je vhodné vždy před samotným tvářením stroj nechat několikrát projet na prázdko, kdy polyuretanový nástroj působí jen na lisovník bez polotovaru. Takto se docílí toho, že se polyuretan ustálí. Křivky závislosti síly na stlačení se ztotožní a lze poté považovat proces za opakovatelný. Výsledkem by mělo být, že všechna vyráběná žebra jsou si rozměrově i tvarově velmi blízká ne-li totožná. [9]

5.2 Varianty technologického postupu výroby

Hlavním problémem při výrobě dílce je zvlnění, které vzniká během operací lisování nahromaděním materiálu v lemech. K jeho odstranění je aktuálně využito ručních operací jak před samotným tvářením, tak i k dotvarování výsledného tvaru žebra. Proto byla provedena první série zkoušek, u kterých byly navrženy pozměněné technologické postupy výroby řešeného žebra.

Všechny naplánované varianty úprav technologického postupu byly voleny s ohledem na výrobní možnosti firmy, dlouhodobou zkušenost s výrobou podobných výrobků a po konzultaci s technologickým oddělením a oddělením tepelného zpracování. Navrhované varianty byly zároveň voleny bez ručních přípravných operací před lisováním, které zahrnují předklepání a stahování plechového polotovaru.

Pro možné následné srovnání a zamezení vlivu změny výrobního zařízení proběhly operace frézování, tepelného zpracování a lisování na strojích k tomu běžně používaných a určených. Přesněji se jednalo o CNC horní frézku CRENO AERO s vakuovou hlavou, lis PO 630 a pece určené k TZ hliníkových slitin splňující patřičnou normu. Taktéž použitý materiál všech polotovarů i vzorků byl z jedné šarže dodaných tabulí pro zamezení vlivu různého chemického složení a mechanických vlastností.

S ohledem na zachování a analýzu vzniku vad při tvářením, nebyly varianty dokončeny do závěrečné fáze výroby dílce a byla použita aktuální geometrie plechového polotovaru. Na závěr byly výsledky jednotlivých postupů porovnány s dílci vyrobenými aktuálně používaným postupem. Stávající postup je stručně sepsán v Tab. 11.

Tab. 11 Aktuální technologický postup výroby.

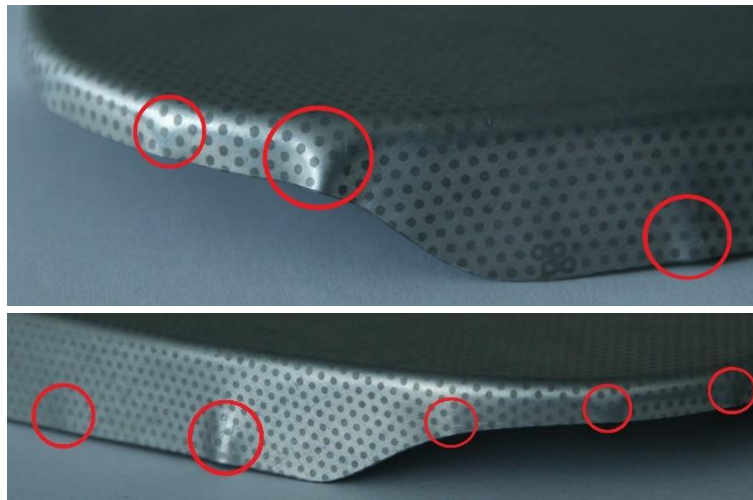
Číslo operace	Název operace
1	Vyfrézování polotovarů a vzorků
2	Odjehlení a začištění
3	Předklepání v nosové části
4	Lisování
5	Doklepání a stahování
6	Odmaštění
7	Rozpouštěcí žíhání
8	Kontrola po TZ
9	Přerovnání
10	Přelisování
11	Dokončení tvaru – doklepání, stahování, pilování, úhlování, atd.
12	Mezioperační kontrola
13	Kontrola tvrdosti
14	Kontrola mechanických vlastností
15	Popis a balení
16	Konečná kontrola

- Varianta 1

Tab. 12 YT00002N.

Číslo operace	Název operace
1	Vyfrézování polotovarů a vzorků
2	Odjehlení a začištění
3	Odmaštění
4	Rozpouštěcí žíhání
5	Kontrola po TZ
6	Rovnění
7	Lisování
8	Mezioperační kontrola
9	Kontrola tvrdosti
10	Kontrola mechanických vlastností
11	Popis a balení
12	Konečná kontrola

Tato varianta spočívala v použití pouze jednoho lisování, které proběhlo po tepelném zpracování. Bylo tak zamýšleno zjednodušení výrobního procesu. Nicméně výsledek, který je patrný z obr. 55 je více než nevyhovující.



Obr. 55 Vady u varianty 1.

Nejen, že nedošlo k odstranění zvlnění, ale při tomto postupu se zvrásnění zvýraznilo a rozšířilo z nosové části i do podélných lemů. Samotná nosová část také vykazovala velkou míru nedolisování a podélné lemy vyšší hodnotu odpružení.

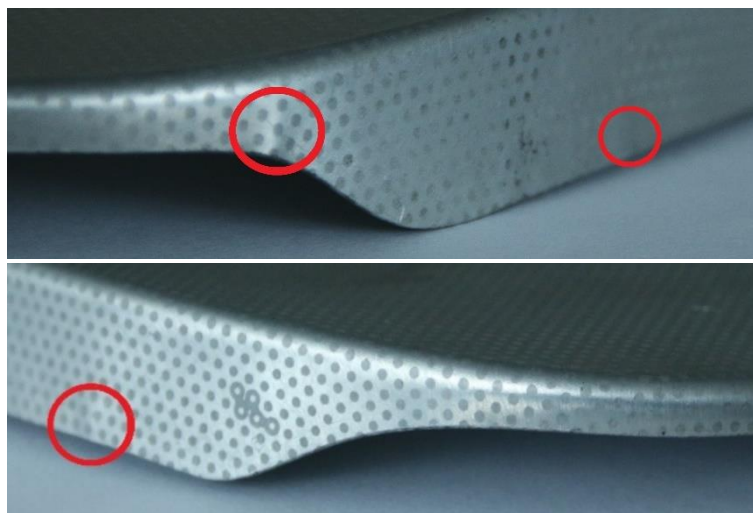
Proto lze konstatovat, že zjednodušením výrobního procesu použitého u této varianty 1 nelze dosáhnout požadovaného tvaru a odstranění vad, které jsou generovány během procesu tváření. Také se potvrdila domněnka nutnosti využití dvou lisovacích operací s vhodným mezioperačním tepelným zpracováním. Použití přelisování žebra je totiž nezbytné pro dosažení požadované geometrie.

- Varianta 2

Tab. 13 YT00001N.

Číslo operace	Název operace
1	Vyfrézování polotovarů a vzorků
2	Odjehlení a začištění
3	Odmaštění
4	Žihání na měkko
5	Kontrola po TZ
6	Lisování
7	Rozpouštěcí žihání
8	Kontrola po TZ
9	Přelisování
10	Mezioperační kontrola
11	Kontrola tvrdosti
12	Kontrola mechanických vlastností
13	Popis a balení
14	Konečná kontrola

Změna použitá v tomto postupu spočívala v zařazení tepelného zpracování před zahájení tváření dílce. Přesněji šlo o normalizační žihání, kterým bylo docíleno zlepšení materiálových vlastností před operací prvního lisování. Výsledek celého technologického procesu lze pozorovat na obr. 56.



Obr. 56 Vady u varianty 2.

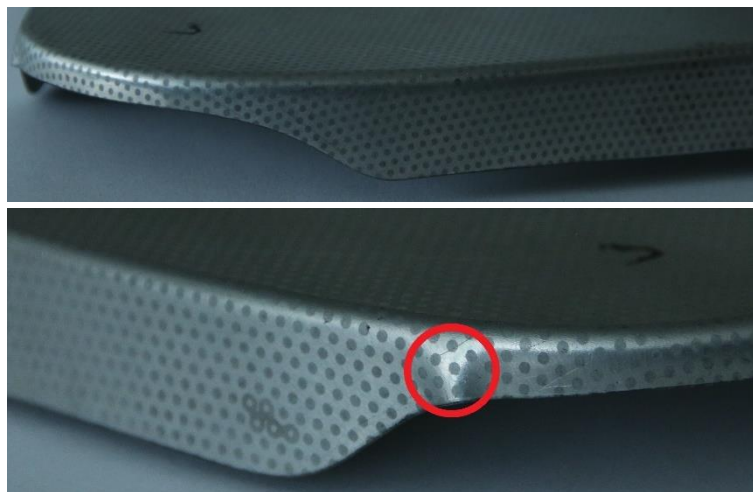
Bylo dosaženo zmírnění vzniku zvlnění, avšak ne v míře dostatečné k odstranění dokončovacích ručních operací. Dále došlo vlivem použitého tepelného zpracování k mírnému ztenčení a zároveň prodloužení lemů. Muselo by proto být ověřeno, jestli lemy splní požadované nároky na pevnost a zda nebude zapotřebí jejich délku dokončovat ostřížením nebo zapilováním. Také z ekonomického hlediska je tento postup náročnější vzhledem k dlouhému setrvání v peci během použitého prvního tepelného zpracování.

- Varianta 3

Tab. 14 YT00003N.

Číslo operace	Název operace
1	Vyfrézování polotovarů a vzorků
2	Odjehlení a začištění
3	Lisování
4	Odmaštění
5	Rozpouštěcí žihání
6	Kontrola po TZ
7	Přelisování
8	Mezioperační kontrola
9	Kontrola tvrdosti
10	Kontrola mechanických vlastností
11	Popis a balení
12	Konečná kontrola

Varianta 3 je variantou aktuálně používaného technologického postupu bez použití operací zahrnujících ruční přípravné a dokončovací práce a rovnání po tepelném zpracování. Tato varianta byla zvolena pro prokázání vzniku defektů a přesného určení kritického místa jejich vzniku, toto místo lze vidět na obr. 57.



Obr. 57 Vady u varianty 3.

Je zřejmé, že místo iniciace zvlnění se nachází na přechodu nosové části do podélného lemu žebra. Vada se opakuje na všech třech zhotovených vzorcích v rámci této série zkoušek. Proto lze konstatovat, že toto vyboulení nemá souvislost s vlivem materiálu potažmo špatně nastavenými podmínkami výroby. Generace této chyby vychází z podstaty technologie lemování vypouklého lemu, která byla detailně popsána v kap. 3.2.

Volbou tohoto postupu bylo prokázáno, že pokud nedojde ke konstrukční úpravě lisovníku nebo plechového polotovaru, bude nadále nutné využití přípravných a dokončovacích ručních operací předklepáním, doklepáním a stahováním, pro docílení výroby žebířů splňujících vysoké nároky na přesnost a vhodných pro další použití.

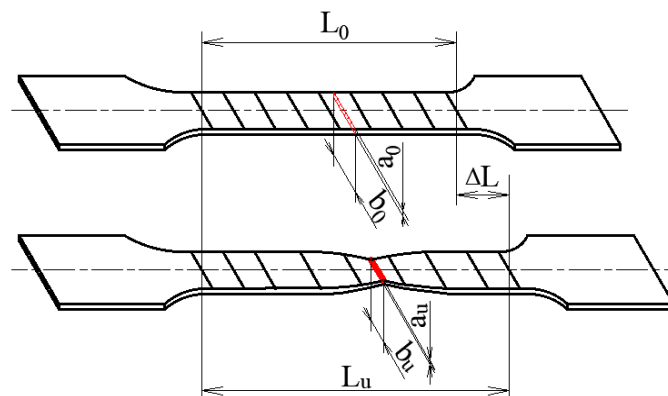
5.3 Mechanická zkouška tahem

Mechanická zkouška tahem, slouží k získání základních materiálových charakteristik zkoumaného materiálu a vytvoření představy o chování materiálu během zatěžování, zejména představy o jeho míře tvářitelnosti. Získané výsledky jsou porovnávány s normou předepsanými hodnotami. Pokud materiál nesplní předepsané hodnoty normou a dosahované hodnoty meze kluzu, meze pevnosti nebo tažnosti jsou menší než předepsané, dílec je nevhodný pro další montáž a je kontrolou vyřazen.

Z tohoto důvodu jsou zhotovovány vzorky, které jsou podstoupeny ke zkoušce na trhačím zařízení. Vzorky nesmí být poškozeny, neboť by to ovlivnilo výsledky měření. Typy vzorků nepoužitelných pro provedení zkoušky lze vidět na obr. 58. Ke znehodnocení obvykle dochází při výrobě, viz obr. 58 a) nebo nevhodnou manipulací, obr. 58 b). Mezi vady se řadí rýhy, škrábance, zátrhy a další. Příprava vhodných vzorků před započítím zkoušky spočívá v označení lihovým fixem, vyrovnaní, odjehlení, přeměření hodnot tloušťky a šířky a nanesení pomocné stupnice pro další vyhodnocení, viz obr. 59.



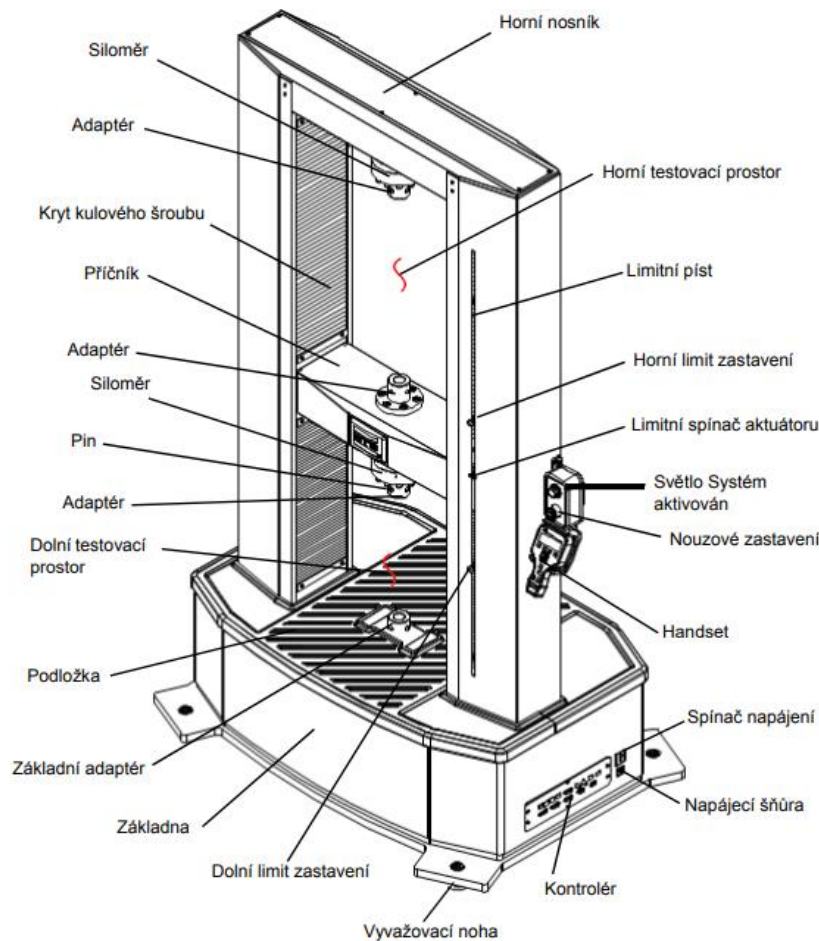
Obr. 58 Nepoužitelné vzorky.



Obr. 59 Vzorek před a po provedení zkoušky.

Po provedení série zkoušek vyhotovení žeber dle jednotlivých variant technologického postupu výroby, bylo zapotřebí provést ověření materiálových charakteristik použitého plechového polotovaru. Vyhodnocení vzorků normalizovaných parametrů a geometrie proběhlo na dvou pracovištích, a to přímo ve firmě Aircraft Industries a.s. a na pracovišti ÚST FSI VUT v Brně.

Ve firmě byl pro provedení tahových zkoušek použit stroj od firmy MTS Exceed. Schéma zařízení a popis jednotlivých částí je na obr. 60. Charakteristika trhačímho zařízení je shrnuta v příloze 1 a výsledky měření sepsány v tabulce, viz příloha 2. [62]



Obr. 60 Schéma MTS Exceed E45.305 [62].

Druhé měření bylo provedeno na zkušebně ÚST, a to především z důvodu potvrzení hodnot a následného vyhotovení materiálového modelu. Použitým přístrojem byl hydraulický zkušební stroj ZD40, který je vyobrazen na obr. 61. Charakteristika a parametry zařízení lze najít v příloze 3. Vyhodnocení provedených zkoušek, viz příloha 4.



Obr. 61 ZD40.

V průběhu zkoušek prováděných na pracovišti ÚST bylo využito snímání procesu pomocí bezkontaktního optického měřicího systému ARAMIS. Byl zaznamenán celý průběh zkoušky a záznam byl softwarem vyhodnocen. Výsledkem bylo získání průběžných hodnot napětí v závislosti na deformaci a vykreslení křivky zatěžování. Postup měření na tomto pracovišti je shrnut v Tab 15. [63]

Tab. 15 Postup trhací zkoušky VUT ÚST

Číslo operace	Název operace
1	Odjehlení a začištění
2	Kontrola a případné vyřazení nebo dodělání
3	Odmaštění
4	Označení lihovým fixem na obou koncích
5	Přelepení konců papírovou páskou
6	Nanesení vzoru
7	Zaschnutí do měkkého stavu
8	Odlepení papírové pásky
9	Upnutí
10	Nastavení trhacího zařízení
11	Spuštění zkoušky a záznamu
12	Vypnutí zařízení a záznamu po přetržení vzorku
13	Vyndání vzorku ze zařízení a vyhodnocení

Neupravený záznam trhací zkoušky bylo nutné zpracovat. K tomuto účelu posloužil program GOM Correlate. Došlo k ostřížení záznamu, zanesení měřítka a vytvoření deformační sítě. Po těchto nutných úkonech byly vyneseny potřebné body, u kterých bylo vyhodnocováno ztenčení nebo prodloužení v osách x a y. Připravený záznam z měření pro vypsání tabulkových dat změny parametrů v čase lze vidět na obr. 62.

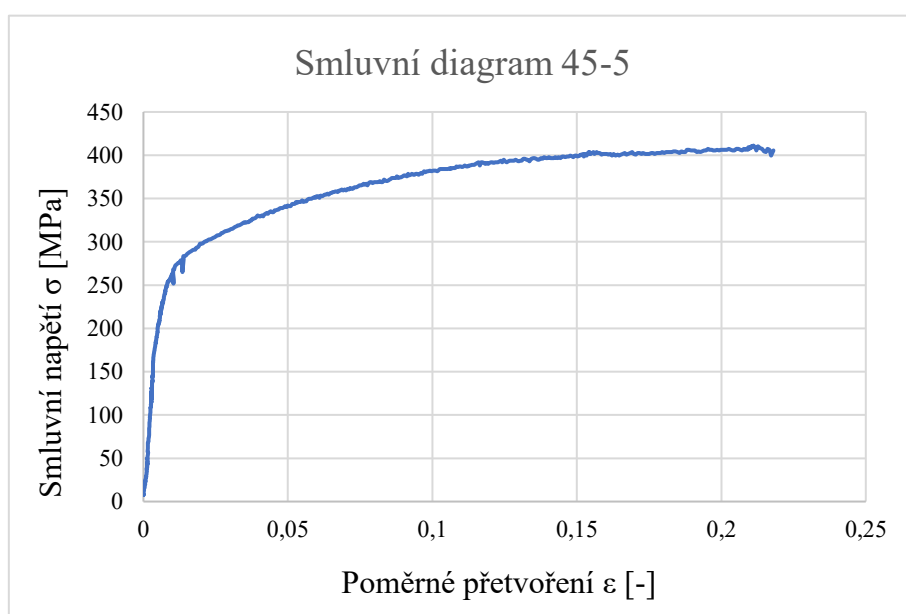


Obr. 62 Vyhodnocený vzorek 45-5 s parametry.

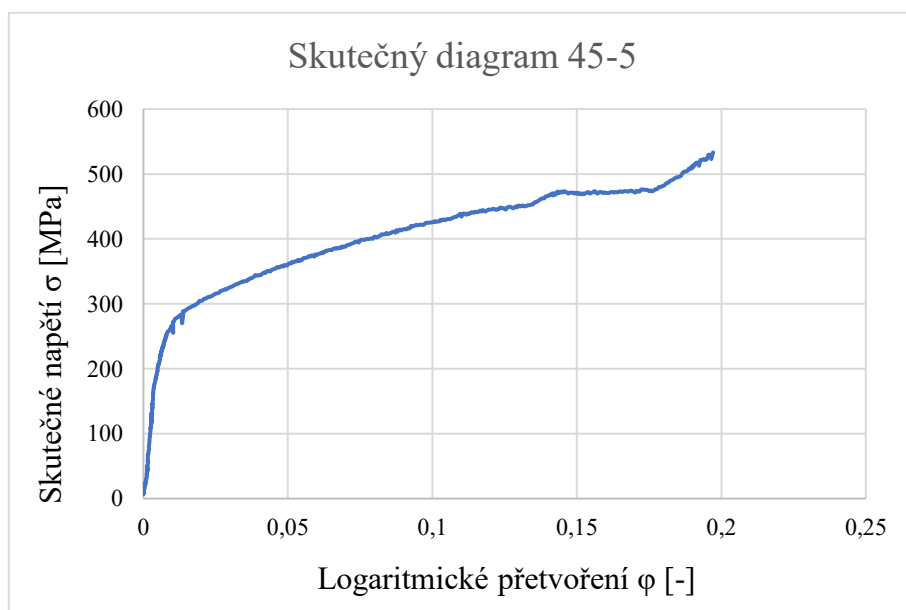
Na obr. 63 jsou vypsané potřebné proměnné pro správný výpočet v MS Excel. Jednalo se o sjednocení záznamů a zapsání počátečních naměřených a volených hodnot. Zkombinováním tabulkových hodnot ze zkušebního stroje a vyhodnoceného záznamu systému ARAMIS vedlo k sestavení smluvních a skutečných tahových diagramů. Pro vzorek 45-5 jsou tyto diagramy znázorněny na obrázcích 64 a 65.

Záznam hodnot		Oblast určení modulu pružnosti	
M-Test [Hz]:	50	Horní mez [MPa]:	200
Aramis [Hz]:	10	Dolní mez [MPa]:	50
Počáteční změřené hodnoty		Oblast určení součinitele anizotropie	
Tloušťka t_0 [mm]:	0,78	Prodloužení [%]:	10
Šířka b_0 [mm]:	12,55		

Obr. 63 Počáteční hodnoty



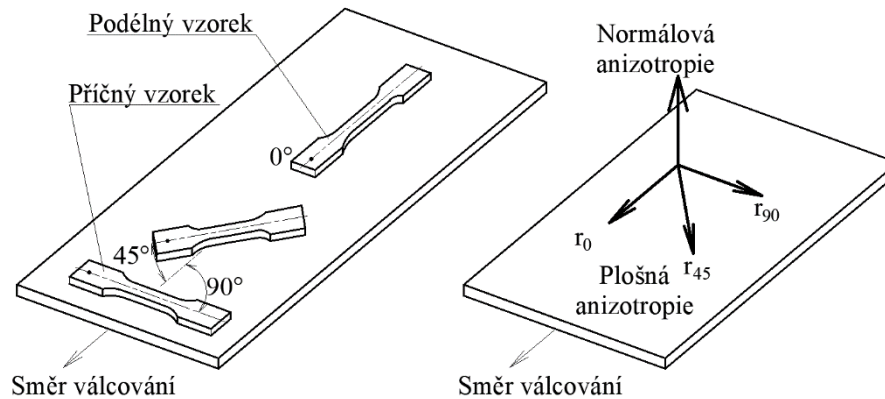
Obr. 64 Smluvní diagram.



Obr. 65 Skutečný diagram.

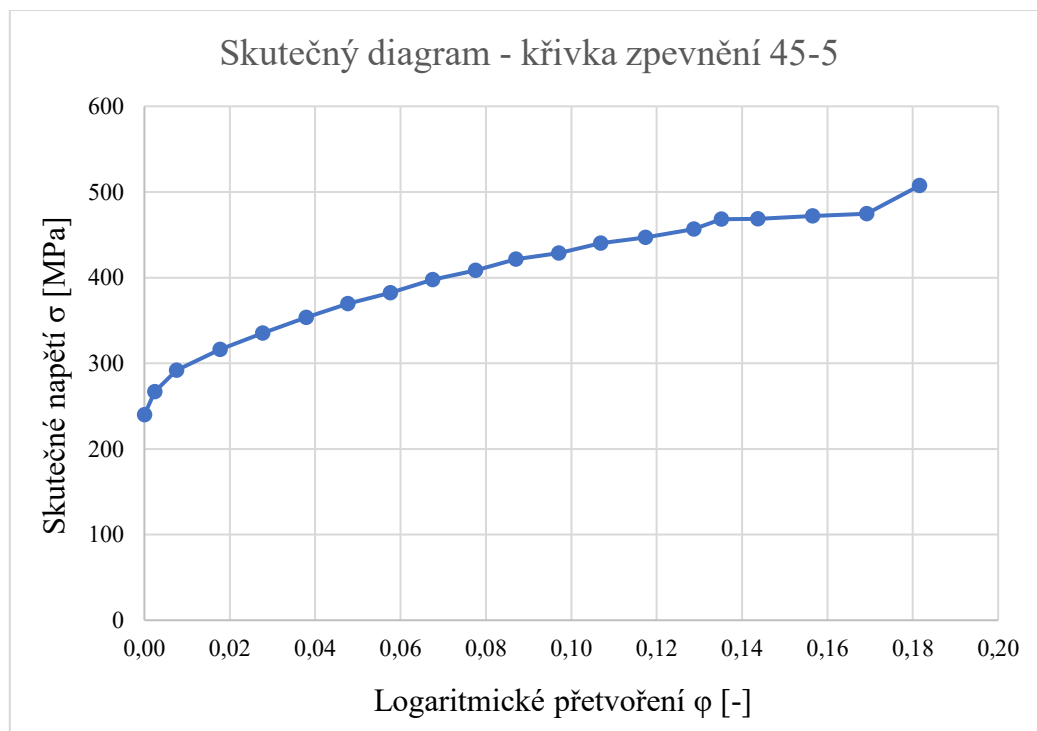
Základní mechanické zkoušky jsou hlavním prostředkem pro získání informací o vlastnostech materiálu. Jedná se především o zkoušku tahem nebo tlakem, krutem a další. Ze získaných hodnot lze poté odvodit, zda je materiál vhodný ke tváření či nikoli a jaké mohou vznikat při zpracování problémy. Souhrnně jsou označovány jako tzv. ukazatele tvařitelnosti. Lze mezi ně zařadit zásobu plasticity, poměr smluvní meze kluzu a meze pevnosti, součinitel anizotropie, exponent deformačního zpevnění, a další.

Právě kvůli anizotropii plechového polotovaru byly vzorky k variantám technologických postupů vyrobeny dle obr. 66, a to podélně se směrem válcování, napříč směru válcování a 45 stupňů od směru válcování. Pro následné provedení statistických výpočtů a zamezení případné chyby byly u každého postupu zhotoveny 3 vzorky od výše zmíněných variant.

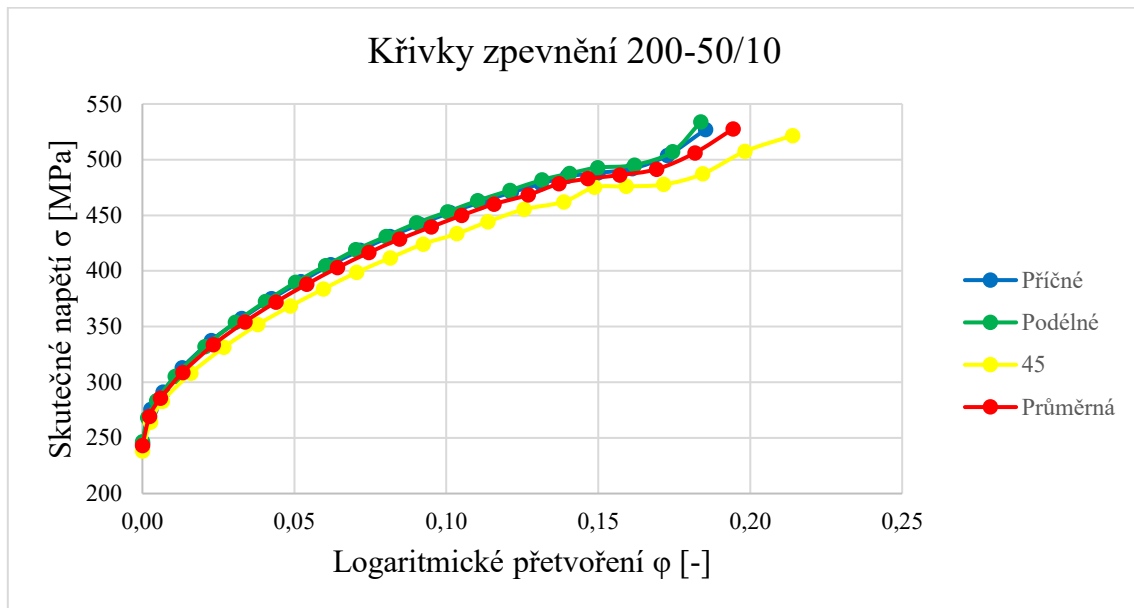


Obr. 66 Anizotropie []

Dalšími výpočty bylo možné sestavit i křivky zpevnění jednotlivých vzorků, viz obr. 67. Po vyhodnocení všech vzorků a zavedení statistiky bylo možné vytvořit graf, v kterém byly vyneseny průměrné hodnoty pro vyrobené podélné a příčné vzorky a vzorky pod úhlem 45 stupňů a celková průměrná hodnota všech zhotovených vzorků vystihující přibližné chování materiálu, to lze vidět na obr. 68. Vypočítaná data použitá k sestavení křivek jsou v příloze 5.



Obr. 67 Diagram zpevnění vzorku 45-5.



Obr. 68 Diagram zpevnění průměrné hodnoty.

Díky všem provedeným měřením a výpočtům bylo možné určení mechanických vlastností v jednotlivých směrech válcování plechových tabulí. Bylo tak lépe vystiženo chování vyráběných polotovarů při různém rozložení na tabuli při frézování.

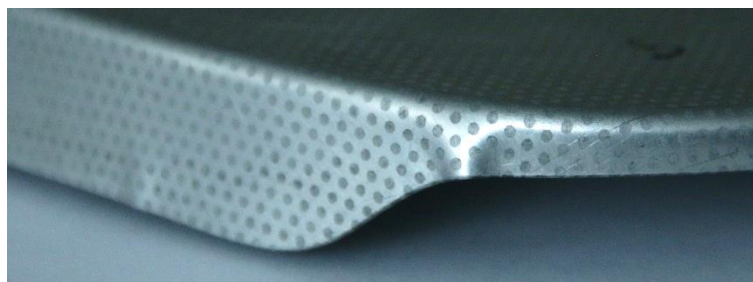
Zároveň pak bylo možné po provedení zmíněných experimentů na pracovišti ÚST FSI VUT a potřebných výpočtů sestavení vstupního materiálového modelu pro simulační programy. Pro správný výsledek simulace jsou dále důležité i materiálové konstanty, které jsou všeobecně shrnuty v Tab. 16.

Tab. 16 Materiálové konstanty materiálu D16 []

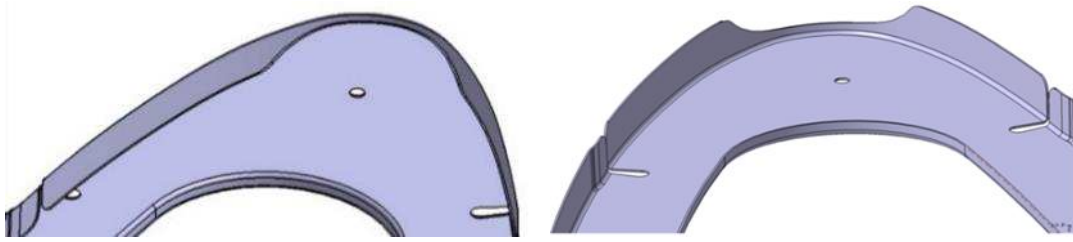
Zkratka	Název	Jednotky	Hodnota
E	modul pružnosti v tahu	MPa	70600 až 73500
G	modul pružnosti ve smyku	MPa	25500 až 27500
μ	Poissonova konstanta	-	0,33
ρ	Hustota	$\text{g} \cdot \text{cm}^3$	2,8

5.4 Možná řešení

Možností, jak vyřešit generaci vad, především zvlnění, viz obr. 69, které vzniká při procesu tváření v nosové části (obr. 70), je více. Může se jednat o změny technologických parametrů při lisování, přidání brzdy v nosové části lisovníku nebo úpravu geometrie plechového polotovaru.



Obr. 69 Zvlnění v nosové části žebra.



Obr. 70 Nosová část žebra.

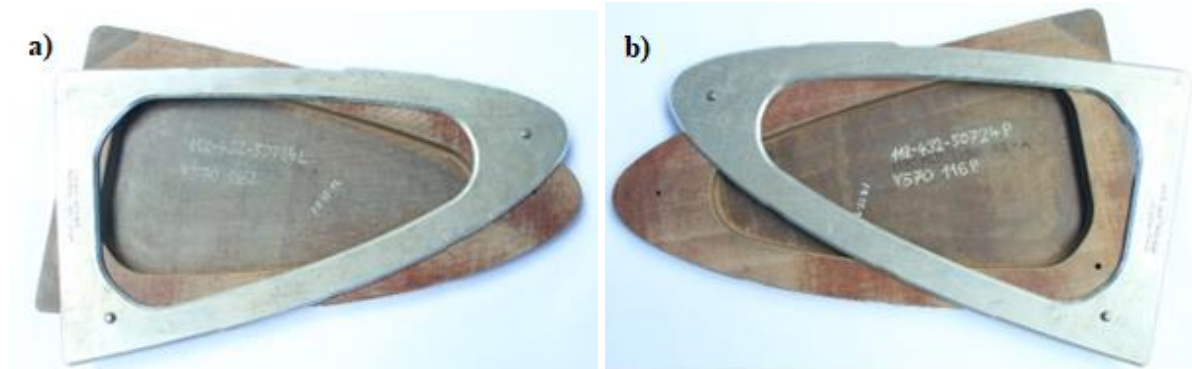
Také by mohlo být transformací zmíněných podmínek dosaženo zlepšení procesu tváření do míry, kdy dojde k odstranění doposud nezbytných ručních přípravných a dokončovacích operací, především vyklepání a stahování tvaru žebra.

U změny technologických parametrů je však nutno dbát ohled na kritické meze zpracovávaného materiálu. Proto nelze tvářecí tlak nebo rychlost zvyšovat nad kritickou hodnotu. Došlo by k znehodnocení dílce prasknutím nebo přetržením lemů.

Opačný postup také není vhodný, neboť při snížení může dojít k nedolisování nebo velkému odpružení tvářeného dílce, což je také nežádoucí. Z tohoto pohledu se jeví jako nejlepší volba změna tvaru plechového polotovaru nebo přidání tvarové brzdy v nosové části žebra.

5.4.1 Úprava konstrukce nástroje

Vzhledem k nutnosti dodržení geometrie nástroje pro zachování následné montáže dílce do sestavy křídla a dodržení jeho tvaru není možné tvar lisovníku nijak upravovat. Aktuální stav tvářecího nástroje lze pozorovat na obr. 71. Nástroj je vyroben v levém (obr. 71a) i pravém (obr. 71b) provedení a je složen z textitového lisovníku, ocelové příložky a dvou kolíků pro zajištění správné pozice plechového polotovaru s příložkou. Detailní pohled na složený nástroj a hranu lisovníku je vidět na obr. 72.

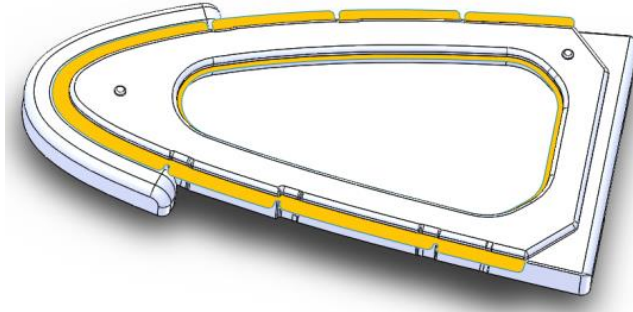


Obr. 71 Aktuální tvářecí nástroj.



Obr. 72 Detailní pohled na nástroj.

Po provedení analýzy, s ohledem na geometrii, zpracovávaný materiál a ze zkušeností s výrobou byla navržena první varianta úpravy nástroje spočívající především v přidání určitého typu brzdy v nosové části. Brzda má zajistit zpomalení tváření dílce za pomoci tření a zamezení vtlačování polyuretanového nástroje. Proto bylo zvažováno i případné přidání maziva. Prvotní návrh je zřejmý z obr. 73



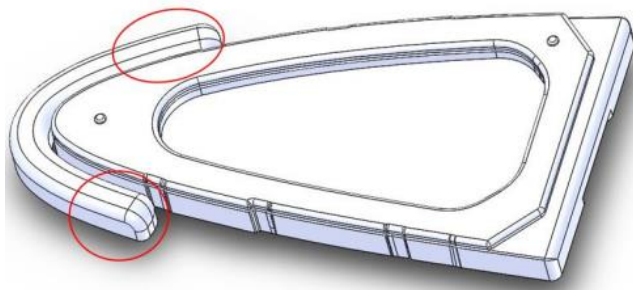
Obr. 73 První návrh tvářecího nástroje.

Tento návrh byl posléze zrealizován a vyroben. Nový nástroj je celý z hliníkové slitiny, lisovník je opatřen drážkou, do které zapadá protikus brzdy. Je tomu tak z důvodu dodržení vzdálenosti mezi zmíněnými prvky, což napomáhá z hlediska opakovatelnosti procesu. Výše popsané je patrné z obr. 74, na kterém je vyobrazen nový nástroj.



Obr. 74 Vyrobený nástroj.

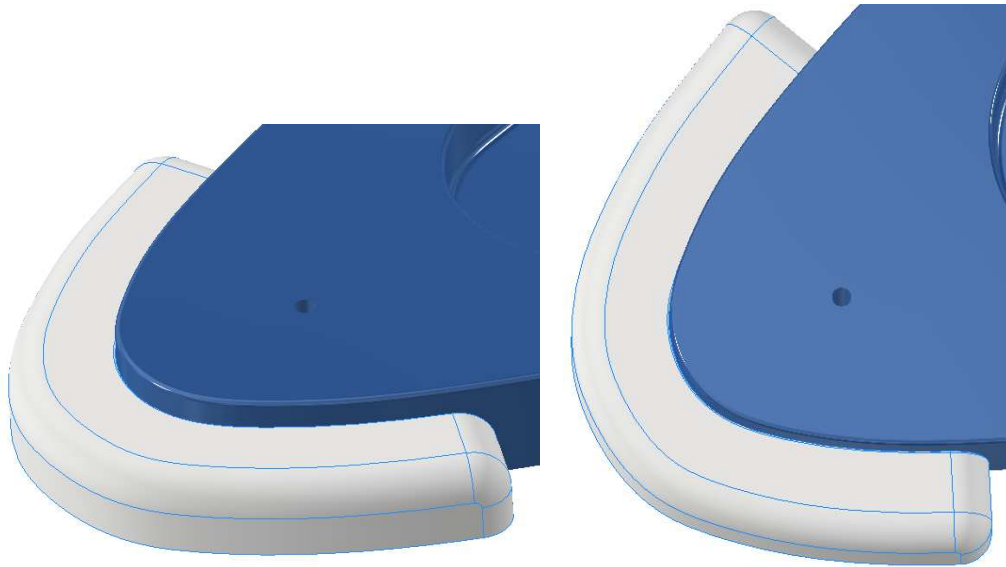
Po provedení zkoušek na stroji ACB EMC 8500 při různých podmínkách byl zjištěn nedostatek tohoto návrhu. Jednalo se o nedolisování a vznik zvlnění generované přibrzděním materiálu v místech prosazení mezi lemy. Místo vzniku je patrné z obr. 75.



Obr. 75 Místo vzniku zvlnění.

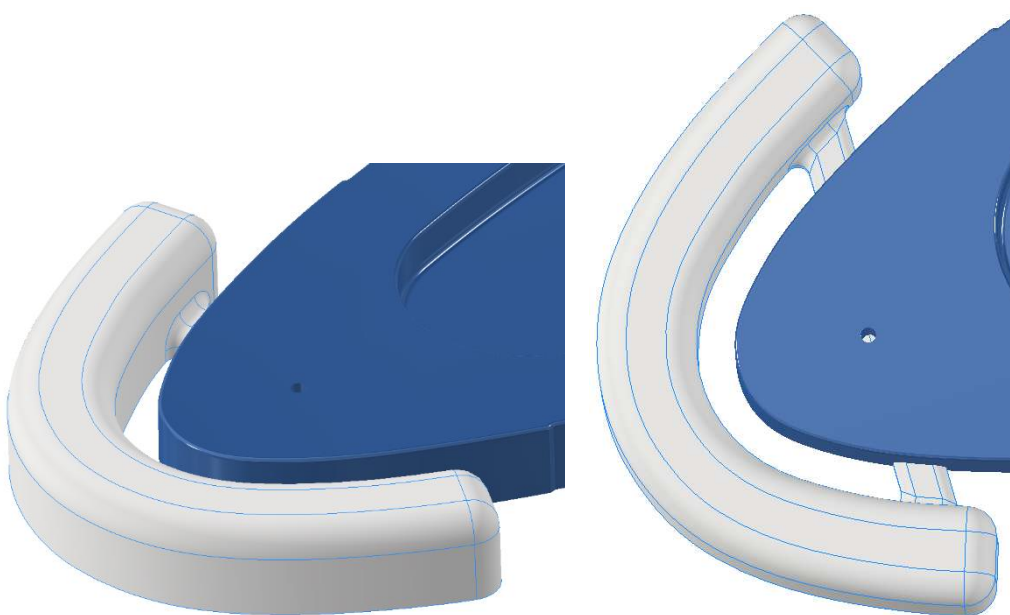
Zpomalení je způsobeno příliš dlouhou brzdou. Zkrácení brzdy v těchto místech by mohlo vést k odstranění zjištěného nedostatku, avšak mohlo by také znamenat vznik zvlnění v novém místě. Toto tvrzení by bylo vhodné podložit simulacemi nebo lépe provedením dalších zkoušek. Ze získaných poznatků z prvotního návrhu a provedených zkoušek byly navrženy následující varianty brzd:

- Nástroj 1 – vyrobení brzdy je možné bez nutnosti úpravy lisovníku. Její výroba vzhledem k tvaru není složitá. Materiálem brzdy nemusí být ocel, ale může být zhotovena z textitu, dřeva nebo tvrdšího polyuretanu. Je opatřena větším vnějším rádiusem pro zmenšení opotřebení tvářecího nástroje. Brzda však není nijak zajištěna proti pohybu vůči lisovníku, a proto není zaručena opakovatelnost operace. Je zde také nebezpečí vzniku podélné vlny po první operaci, která přelisováním nepůjde plně odstranit a je na zvážení, zda nebude při dalším použití dílce vadit. Výše popsany návrh je znázorněn na obr. 76.



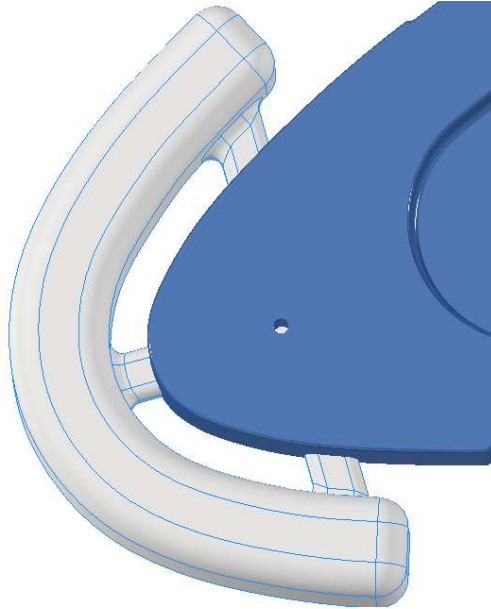
Obr. 76 Nástroj 1.

- Nástroj 2 – možný pohyb brzdy do stran je nutno řešit pomocí odměření, případně rysek na lisovníku a brzdě. Je tím však snížena opakovatelnost výroby a pracovník musí kontrolovat boční vymezení. Je zde složitější konstrukce a výroba brzdy. Brzda musí být zhotovena z tvrdého materiálu, nejlépe hliníkové slitiny nebo oceli. Zároveň je nutná úprava nebo výroba nového lisovníku s drážkou, do které při složení zapadne protikus brzdy. To je vidět na obr. 77.



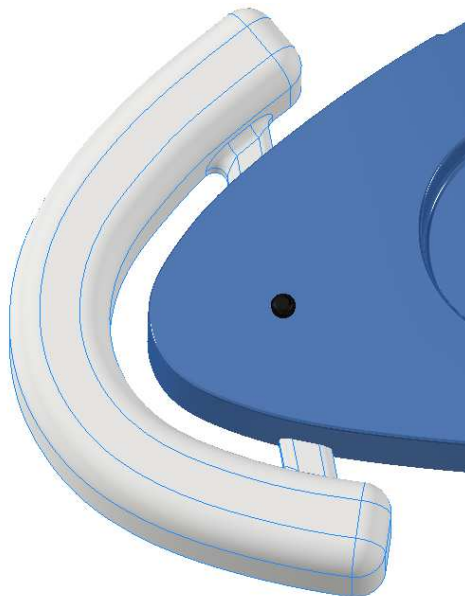
Obr. 77 Nástroj 2.

- Nástroj 3 – úpravou druhé varianty při dodržení požadavku vymezení brzdy a lisovníku vznikla třetí varianta, a to přidáním vymezení ve tvaru T. Je tím zaručena stoprocentní opakovatelnost operace a pracovník musí pouze správně sestavit dané části. Velkou nevýhodou je složitá konstrukce a delší výroba brzdy. Je nutný větší zásah do lisovníku, kdy by bylo vhodnější zhotovení nového lisovníku z vhodnějšího materiálu. Popsaná varianta je na obr. 78.



Obr. 78 Nástroj 3.

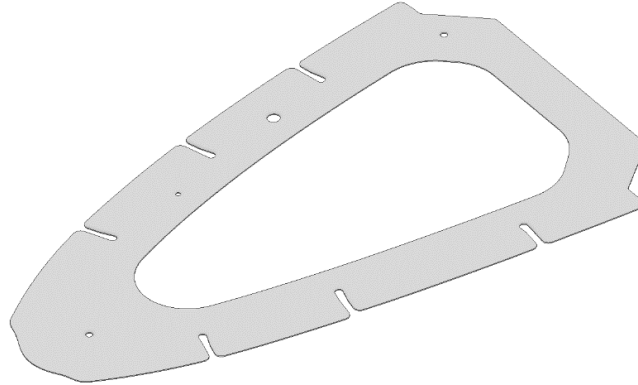
- Nástroj 4 – vymezení lze však také elegantně vyřešit za pomoci vyfrézování drážky na lisovníku v ose otvoru pro vmezovací kolík. Stávající by byl nahrazen prodlouženým a mohl by při zhotovení díry do ustavovací spojnice brzdy zamezit nechtěnému pohybu do stran. Úskalím tohoto řešení je složitější sestavování nástroje. Kolík musí totiž projít přes příložku, plechový polotovar a lisovník až do spojnice brzdy. Popsanou variantu lze pozorovat na obr. 79.



Obr. 79 Nástroj 4.

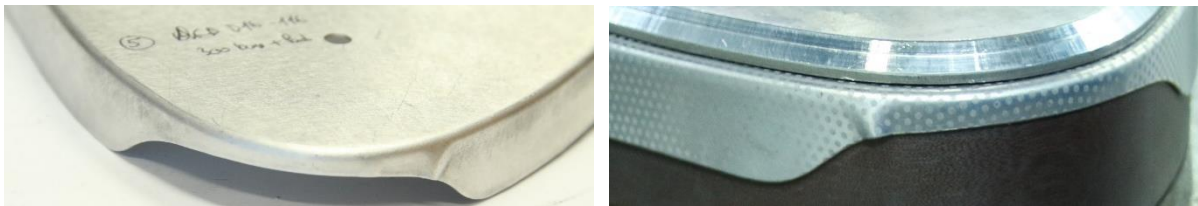
5.4.2 Úprava konstrukce plechového polotovaru

Aktuálně používaná geometrie rozvinu, viz obr. 80 vychází z konečného tvaru žebra. Jedná se tedy o takzvaný “rozvinutý tvar“, který je nejčastěji používán u ohýbání. Malou plochou tvářeného lemu, na kterou může působit lisovnice a vlivem velkého zaoblení žebra v nosové části dochází k hromadění materiálu a následnému vzniku zvlnění.



Obr. 80 Aktuální tvar plechového polotovaru.

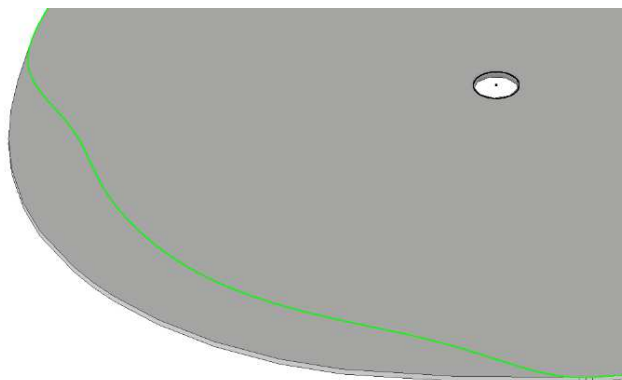
Zmíněnou vadu lze pozorovat na obr. 81 a vyskytuje se u převážné většiny vyrobených vzorků. Tato vada je samozřejmě nežádoucí a je velkou snahou ji eliminovat. Další možností, jak tomuto problému předejít, je úprava tvaru rovinného plechového polotovaru.



Obr. 81 Zvlnění v nosové části.

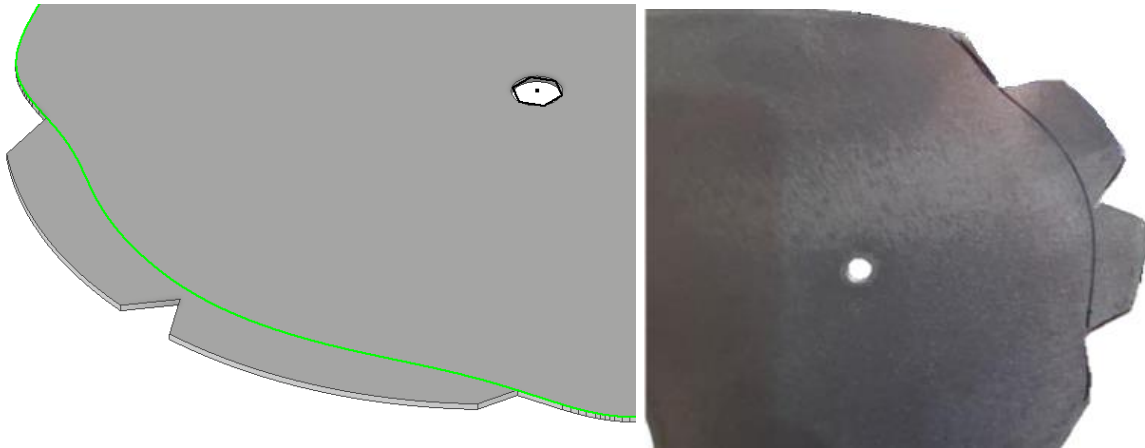
Z výše zmíněných důvodů jsou navrženy nové varianty tvaru plechového polotovaru. Vycházelo se ze zkušeností při výrobě. Cílem byl co nejmenší zásah do aktuální geometrie a docílení jednoduché výroby nové varianty. Ze získaných poznatků z provedených zkoušek byly navrženy upravené varianty:

- Polotovar 1 – vyrobením přídatku po celé délce by mohlo pomoci k lepšímu vytvarování oblasti lemu v nosové části. Přidáním velkého množství materiálu by však vedlo ke vzniku velkého zvlnění a není zaručeno, že by po odstranění vytvořeného přebytku po přiložení šablony nezasahovalo do vytvořené geometrie žebra. Nedošlo by tak k odstranění dokončovací operace doklepáním a stahováním, ale navýšení o operaci orýsování a odstranění přebytku.



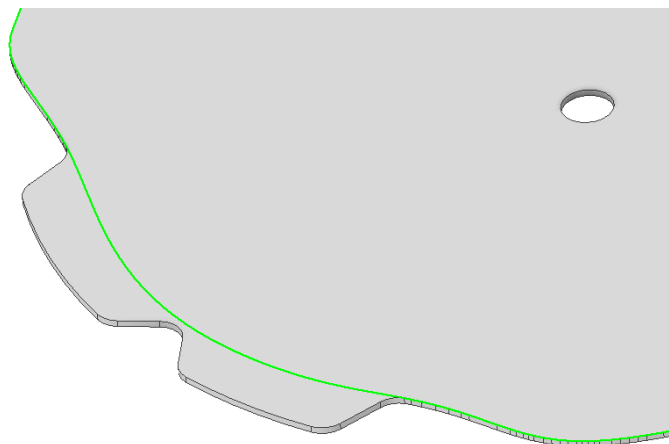
Obr. 82 Polotovar 1.

- Polotovar 2 – odlehčení přídavku v nosové části prostřížením se jeví jako jednoduchá varianta odstranění hromadění materiálu. Úskalím je však možný vznik trhlin iniciovaných právě v místech prostřížení. Vzniklo by tak nebezpečí postupu trhliny do geometrie dílce a následnému znehodnocení. Také opakovatelnost tohoto postupu není zaručena, neboť by musela být vytvořena příkládací šablona pro vyznačení míst ručního prostřížení. Opět by tedy přibýly ruční operace orýsování a ostřížení. Druhou možností by bylo prostřížení na lisu, kdy by byla zaručena opakovatelnost, ale výroba nástroje by byla ekonomicky náročná. U obou zmíněných postupů je však nezaručený výsledek po tvářecích operacích vzhledem ke vzniku trhlin. Navrhovaná varianta je znázorněna na obr. 83, vlevo varianta z 3D modelovacího programu a vpravo zhotovený zkušební vzorek.



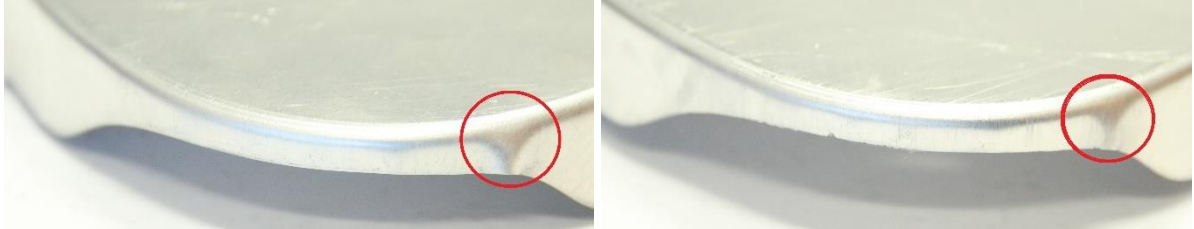
Obr. 83 Polotovar 2.

- Polotovar 3 – úpravou druhé varianty, a to odstraněním nebezpečných míst iniciace trhliny vznikla třetí varianta. Změna spočívá ve vhodném přidání dostatečně velkých rádiusů, což by mohlo problém vzniku trhlin vyřešit. Také výroba by mohla být zjednodušena. Požadovaný tvar totiž může být zhotoven při výrobě frézováním a nebude tak nutné využití dalších ručních přípravných operací, které by zahrnovali prostřížení. Byla by tak zaručena i vysoká opakovatelnost v podobě výroby geometrie plechového polotovaru. U této varianty by však musel být vyhotoven nový CNC program a následně vyzkoušen přímo na frézovacím stroji, zda nedochází k nečekaným problémům. Popsaný návrh lze vidět na obr. 84.



Obr. 84 Polotovar 3.

- Polotovar 4 – délku přídatku lemu a velikost rádiusů by bylo vhodné optimalizovat pomocí simulace a následně provést zkoušky k potvrzení správnosti konstrukce. Také počet vybrání nemusí být konečný a může být použita konstrukce více vybrání zkonstruovaných s ohledem na tvorbu zvlnění především v místě patrného z obr. 85. Jsou zde vyobrazeny dva dílce s opakovanou vadou ve stejném místě při různých parametrech tváření.



Obr. 85 Opakovaná vada.

Konstrukce se čtyřmi vybráními zohledňujícími tento jev je vyobrazena na obr. 86. Přídatky lemů jsou posunuty do míst přechodu nosové části do podélného lemu. Zde totiž nejčastěji dochází ke vzniku problému při tváření.

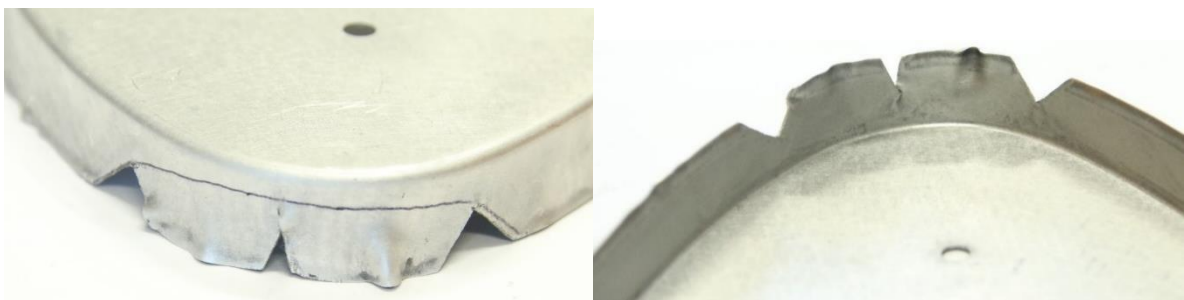


Obr. 86 Polotovar 4.

5.4.3 Kombinace změny konstrukce a parametrů tváření

Byla provedena další série zkoušek, které proběhly za různých podmínek a zahrnovaly změny spočívající v lisování s a bez překrývací gumy, použití různých tlaků tváření a v některých případech využití mazání. Dále také varianty bez využití brzdy a s využitím brzdy, kdy byl variován i počet následných přelisování.

Nejlepších výsledků bylo ze zhotovených kombinací dosaženo sloučením variant polotovaru 2 a nástroje 2. Parametry tváření při této zkoušce zahrnovaly tlak 300 barů a využití mazání brzdy. Výsledek tohoto procesu lze vidět na obr. 87.

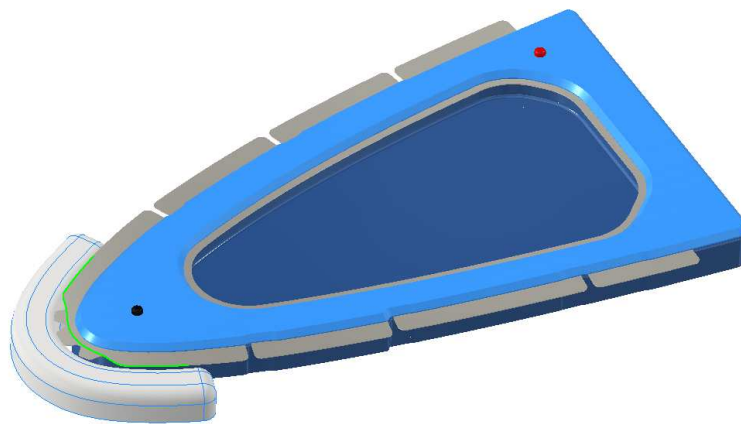


Obr. 87 Vyrobený dílec kombinací změny parametrů.

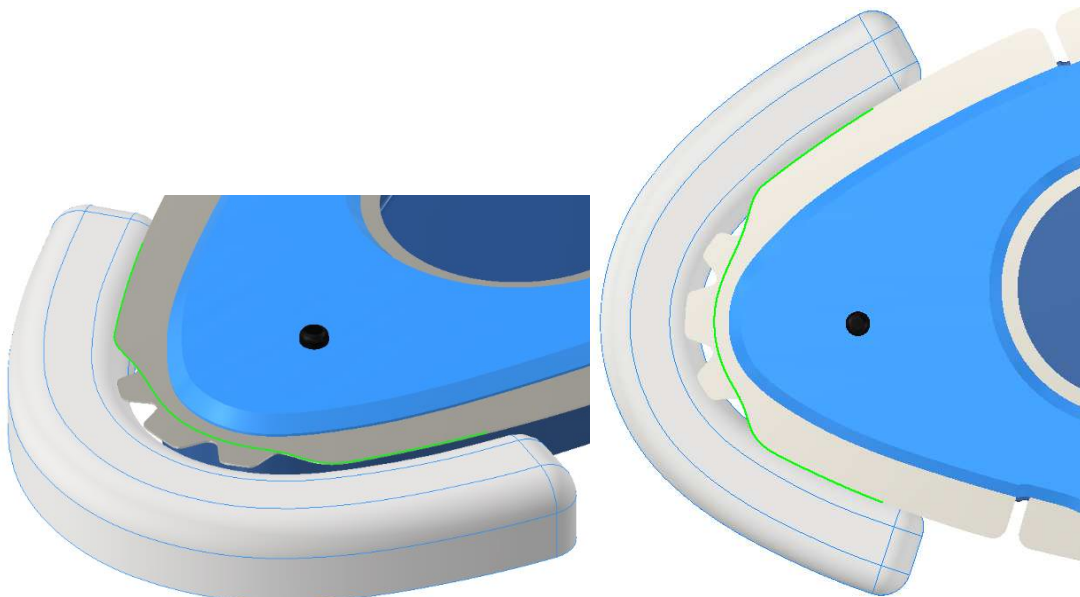
Zvlnění se v nosové části výrobku posunulo směrem k okraji lemů a nezasahovalo do výsledného tvaru dílce. Dle předpokladu však došlo v místě středního prostřížení k tvorbě trhliny. Bylo však po orýsování požadovaného tvaru žebra prokázáno, že trhlina se nakonec nerozšířila natolik, aby po ostřížení přebytku materiálu a začištění znehodnotila vyráběný dílec.

Přínosem provedených měření a zkoušek se ukázala možnost zhotovení posuzovaného žebra bez nutnosti využití přípravných a některých dokončovacích ručních operací s výsledkem vhodným pro další použití. Další optimalizací geometrických parametrů především plechového polotovaru a metody výroby by mohlo dojít i k zamezení vzniku prasklin u zmíněného výsledku.

Dalším postupem by tedy mohlo být zhotovení simulací a optimalizace geometrických parametrů plechového polotovaru i brzdy pomocí vhodných programů. To je možné díky provedení zkoušek a výpočtů vedoucích k zjištění materiálového modelu používaného materiálu D16. Možná varianta pro zdokonalení pomocí simulace je vyobrazena na obr. 88 a detailní pohledy lze vidět na obr. 89.



Obr. 88 Navržená varianta 3D pohled.



Obr. 89 Navržená varianta detail.

ZÁVĚR

Řešenou součástí v práci je náběžné žebro používané na letounu L-410. Z toho vyplývá, že jsou na součást kladeny vysoké nároky na dodržení mechanických vlastností i požadované geometrie. V současné době je součást vyráběna tvářením nepevným nástrojem metodou Guerin. Zhotovena je z hliníkové slitiny D16 o tloušťce 0,8mm.

Cílem výzkumu byla analýza výrobního procesu s požadavkem na odstranění přípravných a některých dokončovacích ručních operací z technologického postupu. Zmíněné procedury zahrnovaly předklepání, stahování a doklepání vyráběného žebra. Zároveň však výsledek změny musel být použitelný při dalším začlenění dílce do výroby letadla, tedy bez vzniku vad při navrženém postupu.

Byly proto provedeny série zkoušek a experimentů, při kterých byly měněny technologické postupy, konstrukce plechového polotovaru, konstrukce nástroje přidáním brzdy v nosové části i samotné podmínky tváření. Přesněji šlo o variaci změn rychlosti deformace, tlaku, tvrdosti překrývací elastomerové desky a případné využití maziva.

Dále pro potvrzení mechanických vlastností materiálu po provedení změny postupu byly zrealizovány mechanické trhací zkoušky na dvou nezávislých pracovištích, které potvrdily vhodnost dalšího použití vyrobených dílců. Přínosem je, že díky uskutečnění těchto zkoušek a následným zhotovením potřebných výpočtů bylo možné sestavení materiálového modelu, který lze dále využít jako vstup pro simulační programy.

Prozatím nejlepších výsledků tváření za daných podmínek bylo dosaženo použitím kombinace změny parametrů a geometrie plechového polotovaru i nástroje. Jednalo se o sloučení variant polovaru 2 a nástroje 2 při použití překrývací gumy při přelisování. Nastavené parametry tváření při této zkoušce byly tlak 300 barů a využití mazání brzdy.

Další kroky výzkumu se budou upínat k provedení simulací dalších navrhovaných variant a optimalizaci geometrie nástroje, plechového polotovaru i technologického postupu a použitých tvářecích parametrů při výrobě. Také se očekává vyhodnocení nanesené sítě systémem ARGUS, který umožní vytvoření jasné představy o napěťově-deformačním stavu materiálu a jeho toku v problematických místech dílce.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 978-80-214-4747-9.
2. MARCINIAK, Zdisław. *Teorie tváření plechů*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964. Dostupné z: <https://dnnt.mzk.cz/uuid/uuid:4a168ba0-a760-11e7-ae0a-005056827e52>
3. SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. *Speciální technologie tváření. Část I*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010, 134 s. ISBN 978-80-214-4220-7
4. PLOŠNÉ TVÁŘENÍ [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/technologie_tvareni/kapitola_4.htm
5. L410 UVP-E20. In: *Aircraft Industries a.s.* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://www.let.cz/images/technical/muska_E20_side.png
6. *Výroba L 410: od prvních forem až do záletu* [online]. 2020 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/7280-vyroba-l-410-od-prvnich-forem-az-do-zaletu>
7. IVANČO, Radek. *Výroba žebra křídla*. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, 2019. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/xmlui/bitstream/handle/11012/179009/final-thesis.pdf?sequence=8&isAllowed=y>
8. *GOST 21631-76 - Plechy z hliníku a hliníkových slitin*. 1977, 46 s.
9. *Sheet metal routing* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.creno.com/en/sheet-metal-trimming/>
10. REJNUŠ, Vojtěch. *Využití kapaliny při tváření plechů* [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/31783>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
11. DRDA, Ondřej. *Využití elastomerů ve tváření* [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83236>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Kamil Podaný.
12. *Aircraft Industries, a.s. PREZENTACE SPOLEČNOSTI* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/4076176-Aircraft-industries-a-s-prezentace-spolecnosti.html>
13. *Sheet Metal Forming* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://quintustechnologies.com/metal-forming/>
14. *Elastoforming* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.acb-ps.com/en/technologies/elastoforming>
15. *Aircraft Industries, a.s.* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://www.let.cz>
16. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: ČVUT, 1993, 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
17. *Handbuch der Umformtechnik*. Berlin: Springer, 1996, 565 s. ISBN 3-540-61099-5.
18. TSCHÄTSCH, Heinz. *Metal forming practise: processes, machines, tools*. Berlin: Springer, 2006, xii, 405 s. ISBN 3-540-33216-2.
19. SUCHY, Ivana. *Handbook of die design. Second edition*. New York: McGraw-Hill, 2006, xiii, 729 stran : ilustrace. ISBN 0-07-146271-6.

20. NOVOTNÝ, Karel a Zdeněk MACHÁČEK. *Speciální technologie I: Plošné a objemové tváření. druhé.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 1992. 171 s. ISBN 80-214-0404-3.
21. 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.
22. BAČA, Jozef a Jozef BÍLIK. *Nekonvenčné metódy tvárnenia, Laboratórny zošit: Základy tvárnenia elastickým, kvapalným a plyným prostredím. (skriptum).* STU v Bratislave, 1992. 42 s.
23. *HYDROFORMING* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://inox.fra1.cdn.digitaloceanspaces.com/inoxveneta/2016/11/imm_idroformatura.jpg
24. *Hydraulické lisy* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.zdas.com/cs/trhy-segmenty/dopravni-prumysl/>
25. *Hydraulické lisy* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.industry-eu.cz/files/companies/890388.pdf>
26. CTV 16000. In: ŽĎAS, a.s. – *Elektrické systémy* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.elektroprojekce.eu/wp-content/gallery/ctv16000/ctv16000-05-29-07-013-large.jpg>
27. GRUNT, Michal. *Guerinova metoda tváření plechů.* Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2019, 85 s. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/45353>. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce Bílek, Ondřej.
28. *Katalog PolyTAN* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.polyplasty.cz/files/dokumenty/polyuretan-polytan-a-polyimid-polyjarid-katalog.pdf>
29. *Eckold HF100 Hand Operated Shrinker* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=7HQ_TQ_9-wxE
30. *Tváření Plechů* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://dieffenbacher.cz/front_content.php?idcat=277&lang=6
31. *Manuál - Hydraulický lis PO 630.* Brno, 2019.
32. *Hydraulické lisy HL 1500* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.pracovnistroje.cz/wp-content/uploads/2021/06/hydraulicke-lisy-hl1500.pdf>
33. *ELASTOMER MATRIX FORMING PRESS (EMC)* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.acb-ps.com/en/elastomer-matrix-forming-press-emc>
34. *ELASTOMER MATRIX FORMING PRESS (EMC)* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.acb-ps.com/en/elastomer-matrix-forming-press-emc>
35. *EMC, the elastoforming machine* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=HrMJnBff25c&t=3s>
36. *VÝROBA DÍLŮ AEROSPACE - Elastoformovací lis ACB EMC.* 2020.
37. *Flexforming tray with tools.* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://formingworld.com/quintus-technologies-flexforming/>
38. *Quintus Technologies Flexform (Hydroforming) Principle Animation* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=bzxhFh8tdxI>
39. *Quintus Technologies Delivers High-Pressure Fluid-Cell Press to Piper Aircraft* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://www.metalformingmagazine.com/article/?/>

stamping-presses/hydroforming/quintus-technologies-delivers-high-pressure-fluid-cell-press-to-piper-aircraft

40. *Flexform Fluid Cell Presses* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: https://www.hasmak-t.com/cms-uploads/PDF/Type_QFC_Flexform_Presses_Data_Sheet_EU.pdf
41. SOBOTKOVÁ, Kateřina. *Technologie lemování plechů* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-05-16]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66880>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Eva Peterková.
42. Chen, Lei, Huiqin Chen, Qiaoyi Wang, and Zhihua Li. *Studies on Wrinkling and Control Method in Rubber Forming Using Aluminium Sheet Shrink Flanging* [online]. Elsevier, 2014, [cit. 2022-05-19]. DOI:10.1016/j.matdes.2014.09.057 ISSN 15266125. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/280287016_Studies_on_wrinkling_and_control_method_in_rubber_forming_using_aluminium_sheet_shrink_flanging_process
43. ASNAFI, Nader. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1999, 96(1), 198-214 [cit. 2022-05-19]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00352-0. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S09240136990>
44. SAMEK, Radko. *Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti*. Praha: VA AZ, 1988.
45. HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. New York: Cambridge University Press, 2011, xii, 331 s. ISBN 978-1-107-00452-8.
46. TOMÁŠEK, Jiří. *Směrnice pro stanovení mezních stupňů přetvoření pravidelných tvarů součástí z plechu*. Brno: VUT, 1975, 11 s.
47. MICHNA, Štefan. *Encyklopedie hliníku*. Děčín: Alcan Děčín Extrusions, 2005, 700 s. : il. ISBN 80-89041-88-4.
48. *European steel and alloy grades/number* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://www.steelnumber.com/en/equivalent_alloy_eu.php?zname_id=11587
49. *Konstrukce šípových křídel* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://www.slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Konstr_sip_kridla.aspx
50. *Kovové letecké konstrukce část I Materiály* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/4066886/>
51. Vojtěch D.: *Kovové materiály*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Praha 2006. Str. 129. ISBN 80-7080-600-1
52. LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření: processes - machines - tools*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.
53. MACHEK, Václav, Ladislav VESELÝ, Milan VESELÝ a Jaroslav VIŠŇÁK. *Zpracování tenkých plechů*. Praha: SNTL, 1983, 266 s
54. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. : il. ISBN 80-214-2374-9.
55. SCHINDLER, Ivo a Petr KAWULOK. *DEFORMAČNÍ CHOVÁNÍ MATERIÁLŮ (studijní opory)* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://adoc.pub/teorie-tvaeni-kov-uebni-pomcka.html>

56. *Fyzika kondenzovaného stavu* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/12753328/>
57. *Chování kovů za působení vnějších sil I* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://slideplayer.cz/slide/2458210/>
58. *Fyzika materiálů II Zotavení a rekrytalizace I. část* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://slidetodoc.com/fyzika-materil-ii-zotaven-a-rekrytalizace-1-st/>
59. *Konstrukční geometrie - teoretický výkres* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://slavetind.cz/stavba/konstrukce/kridlo/Kridlo_geom_etalon.aspx
60. PETRÁSEK, Miloslav. *Konstrukce letadel I*. Brno: Vojenská akademie v Brně, 2004.
61. FLÁŠKA, Miroslav a Bedřich ŠTEKNER. *Speciální letecké technologie*. Praha: ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00522-4
62. *MTS Exceed řada 40 – elektromechanické univerzální zkušební stroje* [online]. [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: http://147.33.74.135/knihy/uid_isbn-80-7080-600-1/pages-img/129.html
63. JELÍNEK, Dan. *3D optické měřicí systémy vhodné pro technologie tváření* [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/66048>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Eva Peterková.
64. CITACE PRO. Generátor citací [online]. 2013 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symboly

Označení	Legenda	Jednotka
a	délka volného konce lemu	[mm]
B ₁	parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje	[-]
B ₂	parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje	[-]
b	šířka plechu	[mm]
b _v	velikost Burgersova vektoru	[-]
C _w	parametr zahrnující vlivy tlaku, tvářeného materiálu a vlastnosti nástroje	[-]
d	průměr otvoru	[mm]
G	modul pružnosti ve smyku	[MPa]
E	modul pružnosti v tahu (Youngův modul)	[MPa]
H	rozvinutá výška lemu	[mm]
h	výsledná výška lemu	[mm]
h _{min}	minimální výška lemu	[mm]
J	moment setrvačnosti daného průřezu	[kg · m ²]
K	materiálová konstanta	[MPa]
L _n	délka neutrální plochy po lemování	
n	exponent deformačního zpevnění	[-]
n _w	směrnice přímky plastického zvlnění	[-]
p	tlak	[Pa]
p _e	měrný tlak elastomeru	[Pa]
p ₁	tlak související s výrobou přímého lemu	[Pa]
p _{2vd}	tlak související s výrobou vydatého lemu	[Pa]
p _{2vp}	tlak související s výrobou vypuklého lemu	[Pa]
R _f	konečný poloměr	[mm]
R _i	výchozí poloměr	[mm]
R _L	poloměr lemování	[mm]
r	poloměr zakřivení neutrální plochy	
r _l	poloměr zaoblení lisovníku	[mm]
r _{min}	minimální poloměr zaoblení plechu	[mm]
t	tloušťka plechu	[mm]
t ₀	tloušťka plechu před tvářením	[mm]
y	délka neutrální plochy před lemováním	[mm]
α	faktor interakce dislokací	[-]
π	konstanta	[-]
ρ _d	hustota dislokací	[cm ⁻²]
σ _k	napětí na mezi kluzu	[MPa]
$\bar{\sigma}$	skutečné napětí	[MPa]
τ _s	napětí ve smyku	[MPa]

Zkratky

Označení	Legenda
CNC	Computer numerical control

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Trhací zařízení E 45.305
Příloha 2	Tabulka trhací zkoušky LET
Příloha 3	Hydraulický zkušební stroj ZD40
Příloha 4	Tabulka trhací zkoušky VUT
Příloha 5	Data křivek zpevnění



Specifikace MTS Exceed řady 40 – společné

Třída přesnosti		ISO 7500 třída 0.5 / třída 1 nebo ASTM E4	
Sílová kapacita		± 0.5 % z hodnoty	± 1 % z hodnoty
Rozsah síly*		1 až 100 % jmenovité síly	0,5 až 1 % jmenovité síly
Jmenovitá maximální síla při max. zkušební rychlosti		100%	
Jmenovitá maximální zkušební rychlost při maximální síle		100%	
Přesnost rychlosti		Nastavená rychlost <0,01 mm/min: přesnost rychlosti je v rozsahu ±1,0 % nastavené rychlosti Nastavená rychlost >0,01 mm/min: přesnost rychlosti je v rozsahu ±0,5 % nastavené rychlosti	
Přesnost polohy		V rozsahu ± 0,5 %	
Rozsah měření napětí		0,2 % - 100 % rozsahu stupnice	
Přesnost napětí** (v závislosti na extenzometru)		Třída 0,5 a třída 1	
Bezpečnostní ochrana		Nadměrná síla, limity pojezdu, přepětí a další	
Ochrana proti přetížení		10%	
Vzorkovací frekvence		1000 Hz	
Frekvence řídicí smyčky		1000 Hz	
Požadavky na okolní prostředí (jen pro použití v budově)			
Provozní teplota		5 °C až 40 °C (41 °F až 104 °F)	
Provozní vlhkost		5 % - 85 % nekondenzující	
Teplota skladování		-18 °C až 49 °C (0 °F až 120 °F)	
Max. vlhkost skladování		90% nekondenzující	
Max. nadmořská výška		2000 m	
Systém motoru a pohonu		AC servomotor	
Kuličkové vodící šrouby		Předepnuté	
Měření polohy příčniku		Rotační snímač - enkodér	
Doplňující analogové kanály		2 kanály (např. pro: odporové extenzometry a siloměry)	
Doplňující digitální kanály		1 kanál (např. pro: extenzometr s dlouhým pojezdem a kvadrantní enkodéry)	

* Rozsah závislý na nastavení filtru a laboratorním prostředí.

** Pro kalibraci extenzometru nabízíme kalibrační služby odpovídající ISO 9513, ASTM E83.

Model	E45.305
Maximální rozsah jmenovité síly	300 kN (66000 lbf)
Doplňující jmenovité síly	200 kN, 300 kN 44000 lbf, 66000 lbf
Typ rámu	Podlahové provedení
Zkušební prostor (jeden/dva)	Jeden/dva
Maximální zkušební rychlost	250 mm/min (9.84 in/min)
Minimální zkušební rychlost	0.001 mm/min (0.00004 in/min)
Rozlišení polohy příčniku	0.000017 mm (0.0000007 in)
Vertikální pojezd příčniku	
<i>Standardní</i>	1100 mm (43.30 in)
<i>Rozšířené</i>	1400 mm (55.12 in)
Šířka zkušebního prostoru	580 mm (22.83 in)
Výška rámu	
<i>Standardní</i>	2360 mm (92.91 in)
<i>Rozšířené</i>	2660 mm (104.72 in)
Šířka rámu	1215 mm (47.83 in)
Hloubka rámu	960 mm (37.80 in)
Hmotnost	
<i>Standardní</i>	1700 kg (3748 lb)
<i>Rozšířené</i>	1750 kg (3758 lb)
Elektrické napájení	Třífázové 380-415 V AC, nebo 440-480 V AC, 6.8 Amp 50/60 Hz, 5000 W

<https://www.testsysteme.cz/sites/default/files/obsah/produkt/23/soubory/exceed-40-cz-online.pdf>

Datum	Ozn.1	Ozn.2	F _m [kN]	R _{p02} [MPa]	R _m [MPa]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	A [%]
17.1.2022	1_1-1	příčný	3,972	272,295	442,7	0,72	12,46	20,2
17.1.2022	1_1-2	příčný	3,961	272,891	440,5	0,72	12,49	21,3
17.1.2022	1_1-3	příčný	3,957	277,293	440,8	0,72	12,47	21,2
17.1.2022	1_2-1	podélný	4,037	266,845	449	0,72	12,49	22,2
17.1.2022	1_2-2	podélný	3,98	268,253	442,9	0,72	12,48	22,9
17.1.2022	1_2-3	podélný	3,991	275,383	444,1	0,72	12,48	19,5
17.1.2022	2_1-1	příčný	4,011	275,397	445,7	0,72	12,5	20,9
17.1.2022	2_1-2	příčný	4,094	280,612	456,4	0,72	12,46	20
17.1.2022	2_1-3	příčný	4,076	288,717	454	0,72	12,47	22,1
17.1.2022	2_2-1	podélný	4,054	275,555	451,5	0,72	12,47	18,6
17.1.2022	2_2-2	podélný	4,088	270,527	454,5	0,72	12,49	19,6
17.1.2022	2_2-3	podélný	4,12	283,915	457,8	0,72	12,5	20,6
18.1.2022	3_1-1	příčný	3,918	269,541	436,4	0,72	12,47	20,7
18.1.2022	3_1-2	příčný	3,977	272,689	442,9	0,72	12,47	21,1
18.1.2022	3_1-3	příčný	3,93	267,36	437,3	0,72	12,48	19,4
18.1.2022	3_2-1	podélný	4,075	279,032	453,5	0,72	12,48	19,4
18.1.2022	3_2-2	podélný	4,057	279,631	452,2	0,72	12,46	20,66
18.1.2022	3_2-3	podélný	4,034	267,114	449,2	0,72	12,5	20,1
18.1.2022	4_1-1	příčný	4,03	276,902	448,5	0,72	12,48	18,8
18.1.2022	4_1-2	příčný	4,03	276,902	448,5	0,72	12,48	18,8
18.1.2022	4_1-3	příčný	4,043	278,581	449,2	0,72	12,5	20,4
18.1.2022	4_2-1	podélný	3,9	266,625	433,7	0,72	12,49	18,4
18.1.2022	4_2-2	podélný	4,005	274,573	445,3	0,72	12,49	20,5
18.1.2022	4_2-3	podélný	3,969	272,242	441,4	0,72	12,49	20,9

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj. $\pm 1 \%$ odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy: $\pm 0,01$ mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem TIRAtest v.2.1 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10 002 a EN ISO 6892 s vyhodnocením výsledků a grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60

Datum	Ozn.1	Ozn.2	E [kN/mm]	Rp ₀₂ [MPa]	R _m [MPa]	a ₀ [mm]	b ₀ [mm]	A [%]
23.2.2022	1 1-1	příčný	9,711	252	425	0,78	12,56	18
23.2.2022	1 1-2	příčný	6,564	247	423	0,78	12,52	17
23.2.2022	1 1-3	příčný	7,302	254	426	0,78	12,54	22
23.2.2022	1 2-1	podélný	11,038	259	425	0,78	12,55	18
23.2.2022	1 2-2	podélný	7,438	226	432	0,78	12,55	18
23.2.2022	1 2-3	podélný	11,054	251	429	0,78	12,56	20
23.2.2022	2 1-1	příčný	9,392	254	432	0,78	12,53	18
23.2.2022	2 1-2	příčný	10,536	255	432	0,78	12,56	18
23.2.2022	2 1-3	příčný	11,479	257	432	0,78	12,54	19
23.2.2022	2 2-1	podélný	9,602	253	432	0,78	12,57	16
23.2.2022	2 2-2	podélný	7,043	224	444	0,78	12,58	18
23.2.2022	2 2-3	podélný	9,707	184	442	0,78	12,56	21
02.3.2022	3 1-1	příčný	16,095	277	426	0,78	12,52	24
02.3.2022	3 1-2	příčný	6,24	208	424	0,78	12,52	21
02.3.2022	3 1-3	příčný	7,471	261	420	0,78	12,54	21
02.3.2022	3 2-1	podélný	8,633	259	424	0,78	12,54	22
02.3.2022	3 2-2	podélný	10,422	252	422	0,78	12,56	22
02.3.2022	3 2-3	podélný	11,181	248	418	0,78	12,55	21
02.3.2022	4 1-1	příčný	14,231	287	428	0,78	12,51	22
02.3.2022	4 1-2	příčný	8,07	202	423	0,78	12,53	21
02.3.2022	4 1-3	příčný	7,75	205	424	0,78	12,54	21
02.3.2022	4 2-1	podélný	8,777	230	419	0,78	12,57	24
02.3.2022	4 2-2	podélný	5,65	223	417	0,78	12,57	22
02.3.2022	4 2-3	podélný	10,235	251	425	0,78	12,56	22
23.2.2022	45-1	45	5,306	200	413	0,78	12,52	22
23.2.2022	45-2	45	6,004	216	410	0,78	12,5	22
23.2.2022	45-3	45	9,466	231	414	0,78	12,55	24
23.2.2022	45-4	45	9,426	237	410	0,78	12,55	21
23.2.2022	45-5	45	8,221	213	412	0,78	12,55	16
02.3.2022	45-6	45	7,062	193	408	0,78	12,52	24

Obr. XX Trhací zkoušky VUT

Příčné		Podélné		45		Průměr	
φ [-]	σ [MPa]	φ [-]	σ [MPa]	φ [-]	σ [MPa]	φ [-]	σ [MPa]
0,0000	244,801	0,0000	246,640	0,0000	238,071	0,0000	243,171
0,0027	275,599	0,0017	268,114	0,0026	264,180	0,0023	269,298
0,0067	291,159	0,0046	283,342	0,0066	282,690	0,0060	285,730
0,0131	312,927	0,0107	305,332	0,0159	307,980	0,0132	308,747
0,0227	337,465	0,0205	331,927	0,0268	331,318	0,0233	333,570
0,0327	357,159	0,0305	353,760	0,0379	351,712	0,0337	354,211
0,0425	374,975	0,0405	372,638	0,0487	368,412	0,0439	372,008
0,0522	390,412	0,0504	389,727	0,0595	383,686	0,0540	387,941
0,0619	405,464	0,0602	404,620	0,0704	398,559	0,0642	402,881
0,0717	418,463	0,0702	418,998	0,0815	411,708	0,0745	416,390
0,0814	430,760	0,0801	430,915	0,0923	424,091	0,0846	428,588
0,0913	441,817	0,0902	443,130	0,1034	433,404	0,0950	439,450
0,1011	452,373	0,1003	453,037	0,1137	444,241	0,1051	449,884
0,1110	461,454	0,1103	463,150	0,1256	455,361	0,1156	459,989
0,1213	470,463	0,1209	472,345	0,1386	462,087	0,1269	468,298
0,1311	478,255	0,1315	481,771	0,1487	475,075	0,1371	478,367
0,1398	484,883	0,1405	487,599	0,1592	475,943	0,1465	482,808
0,1499	488,039	0,1498	492,850	0,1715	477,632	0,1571	486,174
0,1612	491,915	0,1619	495,112	0,1844	487,131	0,1692	491,386
0,1727	503,653	0,1744	507,129	0,1982	507,305	0,1818	506,029
0,1853	527,063	0,1837	533,965	0,2139	521,574	0,1943	527,534