

Vliv technologie hlubokého tažení plechů na mechanické vlastnosti

Bc. Jaroslav Kubánek

Diplomová práce
2022

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2021/2022

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jaroslav Kubánek
Osobní číslo:	T20108
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Specializace:	Stroje a nástroje pro zpracování polymerů a kompozitů
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv technologie hlubokého tažení plechů na mechanické vlastnosti.

Zásady pro vypracování

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Výběr plechů pro hluboké tažení.
3. Provedení výroby dílů s různými podmínkami hlubokého tažení plechů.
4. Provedení měření mechanických vlastností.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 9788021447479.

HU, Ping, Ning MA a Yi-guo ZHU. Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming: analysis, simulation and engineering applications. London: Springer, [2013], xiv, 210 s. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-4471-4098-6.

WANG, Darren, ed. Handbook of metal forming process. New York: NY research press, [2015], vi, 212 s. ISBN 978-1-63238-253-5.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **3. ledna 2022**
Termín odevzdání diplomové práce: **20. května 2022**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

prof. Ing. Berenika Hausnerová, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 24. února 2022

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování diplomové práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem diplomové práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá základy tváření se zaměřením na plošné tváření s následným ovlivněním mechanických vlastností plechů. V teoretické části byl řešen základní princip tváření, rozdělení tváření kovů, mechanismy deformace a vliv vnitřní stavby kovů pro tváření. Hlavním cílem práce je technologie hlubokého tažení plechů. Pro technologii hlubokého tažení byly řešeny základní způsoby tváření, vliv jednotlivých parametrů na kvalitu výrobku, návrh tvářecích nástrojů a pomocných přípravků pro hluboké tažení. Vzhledem k náročnosti nastavení technologie bylo nutné řešit otázku vznikajících defektů a jejich eliminaci. Důležitou částí technologie jsou jednotlivé materiály, které se odlišují nejen složením, ale také mechanickými vlastnostmi, které mají rozhodující vliv při volbě pro požadovanou aplikaci. Aby bylo možné zvolit vhodný materiál, provádí se technologické zkoušky, které umožňují simulovat reálné využití plechů. Technologické zkoušky se kombinují s vhodnými mechanickými zkouškami, které popisují vlastnosti materiálu z hlediska namáhání a využití v praxi.

V praktické části diplomové práce se zkoumaly vlivy technologie hlubokého tažení na mechanické vlastnosti zvolených typů plechů. Jednotlivé nastavené parametry jako je rychlost tažení, nastavení tažné mezery, použití přidržovače nebo brzd, mohou značně ovlivnit výsledné mechanické vlastnosti plechu pro další použití. Práce diskutuje vhodné a nevhodné řešení nastavených podmínek pro reálné využití dle zjištěných dat. Pro posouzení změny mechanických vlastností plechových výtažků byly vytvořeny vzorky pro měření důležitých vlastností tažení jako je vtisková tvrdost nebo modul pružnosti. Výstupem práce je vyhodnocení změny mechanických vlastností výtažků vzhledem ke zvolenému materiálu a jeho tloušťce.

Klíčová slova: tváření, hluboké tažení, Erichsen, LDH zkouška, FLD diagram, mikro-tvrdost, instrumentovaná zkouška, AutoForm

ABSTRACT

The diploma thesis deals with sheet metal forming with subsequent influence of mechanical properties. Theoretical part contains general principle of metal forming, distribution of metal forming, mechanisms of crystal lattice deformation and influence of internal metals structure for forming. Main goal of the thesis is to set optimal process parameters for deep drawing technology. Deep drawing is influenced by forming method, process parameters and design of forming tools. Deep drawing technology presents a number of problems that must be eliminated by setting process condition. A substantial part of the thesis focuses on materials. Materials differ in physical and chemical composition, which is reflected in different mechanical properties. Furthermore, the diploma thesis deals with technological tests of materials used to simulate a real forming process. Technological tests are combined with suitable mechanical tests. Tensile tests and hardness tests are used to evaluate mechanical properties of metals.

Practical part examines the influence of process parameters on mechanical properties of metal sheets. Individual set parameters, such as drawing speed, can significantly affect the results of mechanical properties for further use.

Keywords: forming, deep drawing, FLD diagram, Erichsen test, LDH test, micro-hardness, depth sensing indentation, AutoForm

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, veškeré rady a především za seznámení se složitou problematikou hlubokého tažení plechových dílů.

Prohlašuji, že odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	12
I TEORETICKÁ ČÁST	13
1 TVÁŘENÍ	14
1.1 PRINCIP TVÁŘENÍ.....	14
1.1.1 Krystalová stavba kovů	14
1.1.2 Deformace	15
1.1.3 Způsoby plastické deformace.....	17
1.2 ROZDĚLENÍ TVÁŘENÍ.....	19
1.2.1 Tváření za studena.....	20
1.2.2 Tváření za tepla	21
1.2.3 Objemové tváření	22
2 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ	23
2.1 HLUBOKÉ TAŽENÍ PLECHŮ	23
2.1.1 Tažení válcového výtažku.....	24
2.1.2 Způsoby tažení plechů.....	28
2.2 PARAMETRY HLUBOKÉHO TAŽENÍ VÁLCOVÝCH VÝTAŽKŮ BEZ ZTENČENÍ STĚNY.....	28
2.2.1 Velikost přístřihu plechu	28
2.2.2 Určení způsobu tažení	29
2.2.3 Geometrie a tvar funkčních částí nástrojů.....	30
2.3 PARAMETRY HLUBOKÉHO TAŽENÍ VÁLCOVÝCH VÝTAŽKŮ SE ZTENČENÍM STĚNY.....	33
2.4 VÝTAŽEK NEROTAČNÍHO TVARU	34
2.4.1 Určení přístřihu	35
2.4.2 Počet tažných operací.....	36
2.4.3 Tažná mezera pro nerotační výtažky.....	36
2.5 NÁSTROJE PRO TAŽENÍ	36
2.5.1 Materiál nástrojů	38
2.5.2 Stroje pro hluboké tažení plechů.....	39
2.5.3 Brzdy	40
2.5.4 Přidržovač	40
2.5.5 Mazání.....	41
2.6 VADY VÝTAŽKŮ	42
3 MATERIÁLY PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ	44
3.1 VLASTNOSTI PLECHŮ VHODNÉ K TAŽENÍ	44
3.2 HLUBOKOTAŽNÉ OCELI	45
3.2.1 Nízko pevnostní oceli IF (Interstitial Free)	45
3.2.2 Vysoko pevnostní oceli IF-HS (High Strength steels).....	46
3.2.3 Vysoko pevnostní BH oceli	46

3.2.4	HSLA (High Strength Low Alloy) oceli	47
3.2.5	DP (dual phase) oceli	48
3.2.6	CP (Complex Phase) oceli	48
3.2.7	TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli.....	49
3.2.8	TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli	49
3.2.9	MS (Martensitic steel) oceli	50
3.2.10	Běžně využívané oceli.....	51
4	TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY PLECHŮ	52
4.1	ZKOUŠKA DLE ERICHSENA	52
4.2	TEST LDH/NAKAJIMA A MARCINIAK.....	53
4.3	ZKOUŠKA ROZŠIŘOVÁNÍM OTVORU DLE SIEBELA A POMPA.....	55
5	ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	57
5.1	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	57
5.1.1	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	57
5.1.2	Zkouška mikro-tvrdosti dle Vickerse.....	59
5.2	INSTRUMENTOVANÁ ZKOUŠKA TVRDOSTI DSI	59
5.2.1	Princip metody DSI.....	61
5.2.2	Stanovení vtiskové tvrdosti H_{IT}	61
5.2.3	Stanovení vtiskového modulu E_{IT}	62
5.2.4	Stanovení vtiskového tečení C_{IT}	63
5.2.5	Stanovení práce plastických a elastických složek vnikacího procesu.....	64
II	PRAKTICKÁ ČÁST	66
6	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	67
7	VÝBĚR PLECHŮ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ	69
7.1	OCEL EN 1.4376	69
7.2	TLOUŠŤKA VYBRANÝCH PLECHŮ.....	70
8	SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ.....	71
8.1	MODEL SOUČÁSTI.....	71
8.2	AUTOFORM R8.....	72
8.2.1	Import součásti	72
8.2.2	Přiřazení materiálu	73
8.2.3	Výrobní plán.....	73
8.2.4	Vytvoření tažníku a přidržovače	74
8.2.5	Úprava profilu tažníku	75
8.2.6	Definice přístřihu plechu	76
8.2.7	Definice brzdících elementů	76
8.3	VÝSLEDKY SIMULACE - TVÁŘITELNOST	77
8.3.1	Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5).....	79
8.3.2	Erichsen – 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1)	79
8.3.3	Erichsen – 28 mm, tl. 1,5 mm (E28TL1,5)	80
8.3.4	Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)	81
8.3.5	LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)	81

8.3.6	LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)	82
8.3.7	LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)	82
8.4	VÝSLEDKY SIMULACE – MAX FAILURE	83
8.4.1	Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5)	83
8.4.2	Erichsen – 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1)	84
8.4.3	Erichsen – 28 mm, tl. 1,5 mm (E28TL1,5)	84
8.4.4	Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)	85
8.4.5	LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)	85
8.4.6	LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)	86
8.4.7	LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)	86
8.5	VÝSLEDKY SIMULACE – THINNING.....	87
8.5.1	Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5).....	87
8.5.2	Erichsen - 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1).....	88
8.5.4	Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)	89
8.5.5	LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)	89
8.5.6	LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)	90
8.5.7	LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)	90
8.6	PŘÍPRAVA VZORKŮ PRO MĚŘENÍ.....	91
8.6.1	Příprava plechů.....	91
8.6.2	Hluboké tažení plechu na zařízení BUP-600	92
8.6.3	Příprava preparátů plechu a návrh oblastí pro měření	97
8.6.4	Zapouzdření preparátů plechů	99
8.6.5	Broušení vzorků	101
8.7	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	102
8.7.1	Měřená místa – Erichsenova metoda	102
8.7.2	Měřená místa – LDH metoda.....	103
8.7.3	Měřicí zařízení – Mikro-kombi tester MCT ³	104
8.7.4	Postup měření.....	105
9	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	108
9.1	VTISKOVÁ TVRDOST H_{IT}	108
9.1.1	LDH metoda.....	108
9.1.2	Erichsenova metoda – 28 mm	109
9.1.3	Erichsenova metoda – 20 mm	110
9.2	MIKRO-TVRDOST DLE VICKERSE H_{VIT}	111
9.2.1	LDH metoda.....	111
9.2.2	Erichsenova metoda – 28 mm	112
9.2.3	Erichsenova metoda – 20 mm	113
9.3	VTISKOVÝ MODUL PRUŽNOSTI E_{IT}	114
9.3.1	LDH metoda.....	114
9.3.2	Erichsenova metoda – 28 mm	115
9.3.3	Erichsenova metoda – 20 mm	116
9.4	ELASTICKÁ W_{ELAST} A PLASTICKÁ W_{PLAST} ČÁST PRÁCE VNIKACÍHO PROCESU	118
9.4.1	LDH metoda.....	118

9.4.2	Erichsenova metoda – 28 mm	120
9.4.3	Erichsenova metoda – 20 mm	121
DISKUZE VÝSLEDKŮ		124
ZÁVĚR		128
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....		129
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....		137
SEZNAM OBRÁZKŮ		142
SEZNAM TABULEK.....		146

ÚVOD

Technologii hlubokého tažení lze považovat za velmi rozšířenou ve všech oblastech výroby a velké množství výrobků je vyrobeno právě touto technologií. Hlubokým tažením lze vyrábět široké množství dílů nejrůznějších tvarů a velikostí. Výhodou procesu tažení a k němu přidružených postupů je především snížení času výroby, optimalizace odpadu a redukce jednotlivých operací výroby. Složitě lisy a tvarovací zařízení umožňují provádět více operací za sebou, takže lze vyrobit hotový díl na jednom typu zařízení, aniž by muselo být zasazeno do procesu výroby. Další výhodou technologie spočívá v odstranění dokončovacích operací, a to především díky vysoké kvalitě tažných nástrojů. Povrch výrobku odráží kvalitu samotných nástrojů. Proces tažení je však ovlivněn podstatným množstvím faktorů, které je nutné hlídat, aby bylo možné vyrobit výrobek bez vad. Této skutečnosti pomáhá rozvoj nových typů materiálů, vývoj pevnějších a odolnějších nástrojů, možnost vyrábět přesnější tažné nástroje díky vývoji obrábění nebo využívání pomocných prvků jako jsou brzdící elementy a profilované přídržovače.

Velká změna v oblasti hlubokého tažení nastává díky využití simulačních programů, které upozorní na nevhodný návrh tvarů výrobku, případně tvaru tažných nástrojů. Nastavením simulací lze nastavit vhodný tvar přístřihu plechu, aby nedocházelo ke vzniku nadměrného množství odpadu. Velkým bonusem simulace je ověření vhodnosti zvoleného materiálu pro hluboké tažení a případné změny ve volbě tloušťky materiálu. S vývojem nových materiálů dochází ke zvyšování pevnostních vlastností materiálů a zároveň ke zvýšení tažnosti, a to i přes stále vyšší požadavky na nižší hmotnost dílů, která se řeší především snížením tloušťky plechu. Se zvyšujícími se nároky na materiály je nezbytné řešit i pevnost nástrojů a jednotlivých dílů, u kterých by docházelo k nadměrnému opotřebení, což vede ke zvýšení nákladů, které se musí projevit na ceně dílů. Návrh výrobků tedy musí být vzájemně provázán při konstrukci, aby nedošlo ke vzniku drahých chyb.

Hluboké tažení má uplatnění především v oblasti automobilového průmyslu, dále lze výrobky najít u letadel, lodí a těžké techniky. Další oblastí je elektro-technický průmysl, výroba dřezů, plechových krytů aj. Stále se zvyšující náklady posouvají technologii hlubokého tváření kupředu, a proto je možné vyrábět v malých i sériových výrobcích bez ohledu na snížení kvality dílů.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVÁŘENÍ

Jedná se o technologii zpracování kovů a slitin kovů bez odběru třísky. Nástroj vhodného tvaru působí definovanou silou na polotovar, čímž je převeden do plastického stavu. Vyvození dostatečně vysokého napětí v polotovaru způsobí přemístování určitého objemu materiálu bez porušení celistvosti, tím dochází ke změnám tvaru a tedy ke tváření. Hlavní mechanismus tváření je dán vznikem plastických deformací, které vznikají při překročení meze kluzu daného materiálu. Při tváření dochází nejen k fyzikálním změnám materiálu, ale i změnám struktury, což vede ke změnám mechanických vlastností. [1]

Tváření je jednou z nejproduktivnějších technologií pro zpracování kovů a kovových slitin, slouží nejen pro výrobu hutních a strojních polotovarů, ale i pro výrobu konečných součástí ve většině oblastí strojírenské výroby. Náklady nástrojů a samotných strojů jsou vysoké, proto se technologie používá primárně pro velkosériovou výrobu.

Více než 90% ze všech produkovaných kovových polotovarů se zpracovává pomocí válcování, kování nebo např. tažení. Důvodem použití technologií je vysoká produktivita práce, vysoká rozměrová přesnost a také kvalita hotových ploch součástí. Výhodou je beztržkové zpracování, takže nedochází k plýtvání materiálem a poškození povrchu od odebíraných třísek. [1]

Základním pojmem je tvářitelnost, která představuje schopnost materiálu snášet plastické deformace, které umožňují změnu tvaru při zachování soudržnosti materiálu.

1.1 Princip tváření

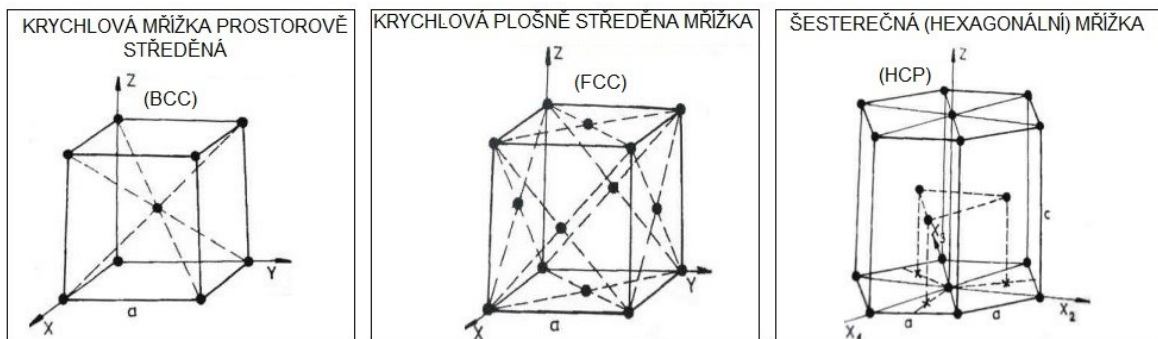
Jedním z důležitých parametrů tvářitelnosti je krystalová stavba kovů. Proces tvarování kovů ovlivňuje uspořádání jednotlivých atomů v krystalové mřížce, tvar krystalů a jejich složení. Proces tváření ovlivňují právě nedokonalosti krystalové mřížky, které jsou nazvány dislokace (hranové nebo šroubové). Dislokace se při zatížení pohybují a způsobují trvalou (plastickou) deformaci.

1.1.1 Krystalová stavba kovů

Kovové materiály v tuhém stavu vytváří krystalickou strukturu, jejíž atomy jsou uspořádány do krystalové mřížky. Při přechodu kovu z taveniny do tuhého stavu dochází ke krystalizaci a orientaci jednotlivých krystalů. Většina kovů krystalizuje v krychlové nebo šesterečné krystalové struktuře. V případě krychlových soustav může vzniknout buď

krychlová plošně středěná mřížka, nebo krychlová prostorově středěná mřížka. Reálná stavba kovů se vyznačuje polykrystalickou strukturou, krystaly obsahují různé nečistoty a příměsi, liší se svojí velikostí a tvarem. Dalším parametrem je samotný proces zpracování kovů, který způsobuje další poruchy krystalické mřížky. Vzniklé krystaly neboli zrna se odlišují chemickým složením, strukturou a orientací krystalových mřížek. Pro zajištění orientace zrn se materiály zpracovávají pomocí mechanických a tepelných procesů. [2]

Typ krystalové mřížky kovů je závislý na vlastnostech atomů, soudržných silách působících mezi atomy, teplotě zpracování a případně na pracovním tlaku. Kovy mohou dle podmínek krystalizovat ve více krystalových mřížkách. [2]



Obr. 1 – Krystalové mřížky kovů [3]

Kovy s mřížkou BCC vykazují relativně dobrou tvářitelnost. Jako příklad lze uvést železo alfa, chrom nebo wolfram. Kovy s FCC mřížkou vykazují dobrou tvářitelnost za studena, problém nastává u austenitických ocelí, u kterých vlivem legujících prvků roste odpor proti tváření, a materiály se vyznačují praskáním na hranicích zrn. Příkladem FCC mřížky je železo gama nebo hliník. V případě čistých kovů jsou krystalové mřížky obsazeny v uzlových bodech pouze atomy základního kovu. Kovy se šesterečnou krystalovou mřížkou HCP jsou ve většině případů obtížně tvářitelné, existují však materiály s mřížkou HCP, které se běžně využívají v odvětvích průmyslu a lze je tvářet (Martenzitické oceli aj.) [3]

1.1.2 Deformace

Ke změně tvaru (deformaci) dochází vlivem působení vnějších nebo vnitřních sil, přitom však nesmí dojít k porušení materiálu. Deformace se dělí na elastickou (pružnou) a plastickou. Elastická deformace se po odstranění zatížení vrátí a zůstává pouze plastická (trvalá) deformace, která je nevratná. [4]

Pružná deformace

Při pružné deformaci dochází k vychýlení atomů z uzlové polohy krystalové mřížky vlivem působícího napětí. Po odstranění napětí se atomy vrací do své původní polohy. Napětí nesmí přesáhnout mez kluzu, za kterou již dochází k trvalé (plastické) deformaci. Krystalické materiály se do určité hodnoty napětí lineárně prodlužují se zvyšující se hodnotou zatížení (mez úměrnosti), což vyjadřuje Hookeův zákon: [2]

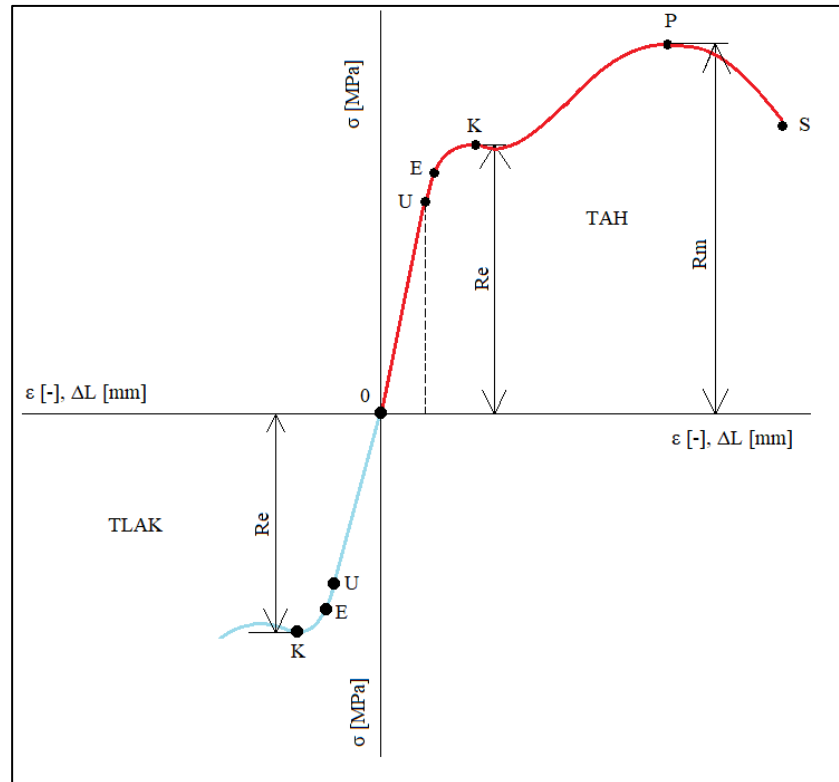
$$\sigma = E \cdot \varepsilon \text{ [MPa]} \quad (1)$$

- σ – velikost napětí [MPa]
- E – modul pružnosti v tahu [MPa]
- ε – poměrné prodloužení [-]

Obr. 2 zobrazuje pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem pro měkkou uhlíkovou ocel. Tento diagram zobrazuje závislost napětí σ [MPa] na poměrném prodloužení zkušební tělesa ε [-]. Hlavními body diagramu je mez úměrnosti U (do této hodnoty je prodloužení zkušební tyče přímo úměrné zatěžující síle a platí Hookův zákon), mez elasticity E (hodnota napětí, do které se zkušební těleso nedeformuje plasticky), mez kluzu K (nejmenší napětí, při kterém dochází k trvalé deformaci a materiál se prodlužuje bez zvyšujícího se napětí), mez pevnosti P (maximální napětí, kterým lze materiál namáhat) a bod S (bod přetržení zkušební tělesa).

Plastická deformace

Aby bylo možné materiál tvarovat, je nutné dosáhnout meze kluzu (napětí, při kterém již dochází k plastické deformaci), nesmí však dojít k překročení meze pevnosti, kde by došlo k trvalému poškození materiálu. Při plastické deformaci dochází ke značnému pohybu atomů krystalové mřížky vlivem vyšší hodnoty napětí. Po odstranění napětí zůstávají atomy ve vychýlené poloze. Plastické deformace jsou uskutečněny pohybem dislokací (poruch krystalické mřížky) v kluzné krystalografické rovině. Mechanismem plastické deformace je skluz. [2]



Obr. 2 – Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem pro měkkou uhlíkovou ocel [5]

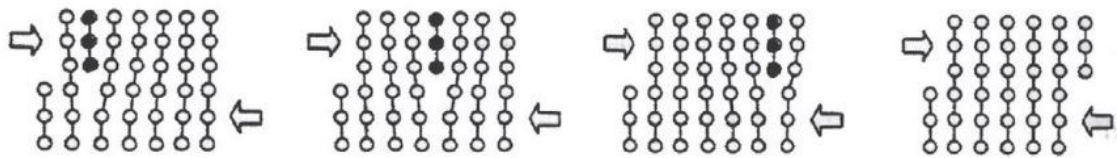
Při tváření za studena dochází ke vzniku a růstu mřížkových poruch (dislokací). Jednotlivé poruchy jsou ve vzájemné interakci, dochází k nahromadění dislokací a tvrdých částic na hranicích zrn, což vede k deformačnímu zpevnění materiálu. Zpevněním dojde k vyčerpání plasticity materiálu a neschopnosti dalšího tváření. Příliš vysoké zpevnění způsobuje vznik napěťových špiček a vznikají mikrotrhliny, které se šíří a způsobují porušení kovu.

1.1.3 Způsoby plastické deformace

Běžně se rozlišují dva základní druhy mechanismů plastické deformace. Plastická deformace nastává dvojčatěním nebo skluzem.

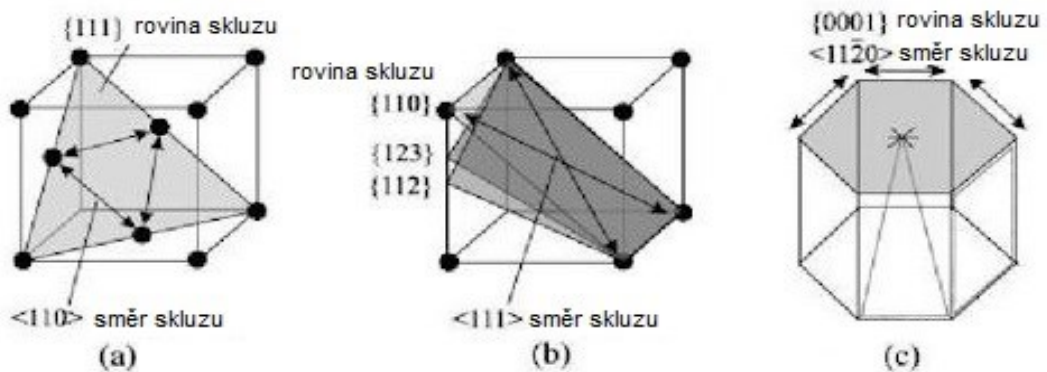
Deformace skluzem

V případě plastické deformace skluzem je uvažován pohyb dislokací v dané krystalografické skluzové rovině vhodným směrem. Ke skluzu dochází v rovinách s nejvyšší obsazeností atomů a zároveň vzniká smykové napětí vyšší než kritické skluzové napětí τ_{krit} . [3]



Obr. 3 - Plastické deformace skluzem při zatížení napětím [6]

Hodnota kritického skluzového napětí je materiálová konstanta. Mezi ovlivňující parametry spadá čistota kovu, struktura, tepelné a mechanické zpracování, případně rychlost zatěžování. Kritické skluzové napětí se snižuje s čistotou kovu a zvyšující se teplotou. Při skluzu dochází k postupným změnám sklonu skluzových rovin podle směru působícího napětí. Nejvíce skluzových systémů má mřížka BCC (48 skluzových systémů), následuje FCC mřížka (12 skluzových systémů) a nejméně obsahuje mřížka HCP (3 skluzové systémy). Dle počtu skluzových systémů lze považovat materiály s mřížkou HCP obecně za nejhůře tváritelné, v praxi však existují materiály, které jsou využívány a lze je tvářet. Pro dobrou tváritelnost je vyžadováno minimálně 5 skluzových systémů, které jsou vzájemně nezávislé. [3]

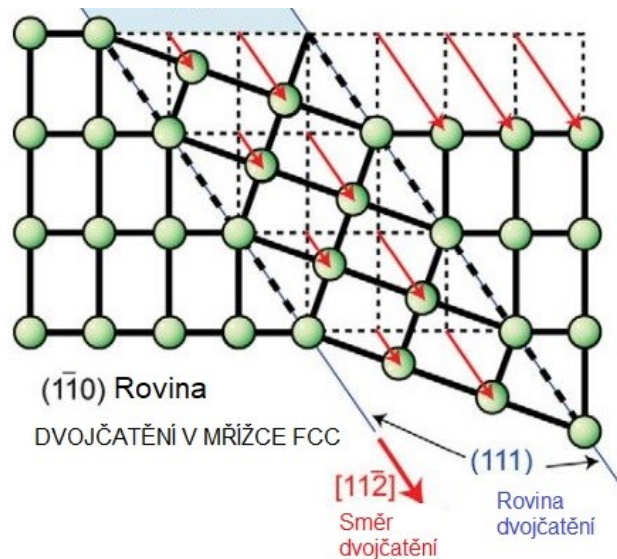


Obr. 4 – Skluzové systémy pro nejhustěji osazené roviny; a) BCC mřížky, b) FCC mřížka, c) HCP mřížka [7]

Deformace dvojčatěním

Jedná se o deformační proces, při kterém prochází krystalem neúplné (parciální) dislokace spojené s existencí chyby vrstev. Plastická deformace dvojčatěním je zvláštní případ skluzu a projevuje se přeskupením úseku krystalové mřížky, kde se atomy přeskupují o zlomky meziatomové vzdálenosti. Přetvořená část má stejnou orientaci, avšak symetricky obrácenou vůči původní rovině. Vznik dvojčatění je odvíjen od pracovní teploty, rychlosti deformace, napětí vzniklého při ohřevu a fázové přeměně. Vzniklé dvojče se v materiálu šíří až rychlostí zvuku v kovech. Mechanismus dvojčatění se nejčastěji projevuje u kovů s hexagonální mřížkou HCP. Častěji se projevuje deformace kluzem, a to vzhledem k nižší

hodnotě kritického napětí než u mechanismu dvojčatění. Výskyt dvojčatění se zvyšuje s nižší teplotou deformace a vyšší rychlostí deformace. [3]



Obr. 5 – Mechanismus dvojčatění mřížky FCC [6]

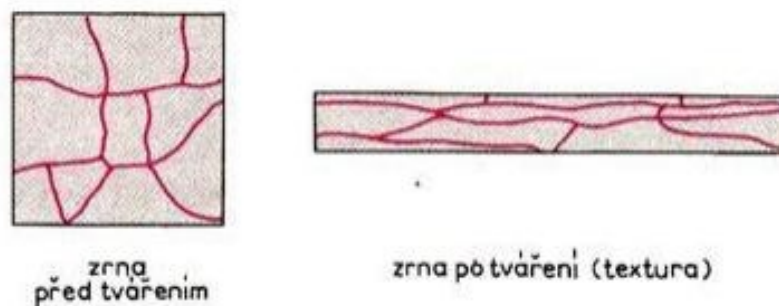
1.2 Rozdělení tváření

Základní dělení tváření kovů se odvíjí od pracovní teploty. Pro velké množství spojovacích materiálů se využívá právě tváření za studena, které probíhá pod teplotou rekrystalizace. Při překročení teploty rekrystalizace materiálu dochází k obnově deformovaných zrn ve struktuře materiálu po tváření za studena. Se zvyšující se teplotou dochází ke změnám deformačního odporu materiálu, zvyšuje se plasticita, a tím se snižují síly potřebné pro přetvoření materiálu. Teplota rekrystalizace je udávána přibližně 40% teploty tání kovu. [8]

Z hlediska dalšího dělení lze rozdělovat tvářecí procesy podle působení vnějších sil na tváření plošné nebo objemové. Při tváření je nutné brát ohled na druh materiálu, protože vyžadujeme velkou tvárnost. Materiály s velkou tvárností mají mez pružnosti a mez pevnosti co nejdále od sebe. Mez pevnosti se nesmí při tváření překročit, aby nedošlo k porušení materiálu. [1]

1.2.1 Tváření za studena

Tváření za studena způsobuje zpevňování materiálu, čímž roste mez pevnosti a hodnota meze kluzu, zároveň se snižuje tažnost kovu vlivem zpevnění. Dle Obr. 6 lze vidět zpevnění jednotlivých zrn po tváření materiálu. Díky zpevnění narůstá odpor proti dalšímu tváření a snižuje se plastičnost materiálu. Po vyčerpání plastičnosti materiálu již nelze materiál tvářet a je nutné ohřátí nad rekrystalizační teplotu, čímž dojde k obnovení zrn po deformaci, vrátí se plasticita materiálu a lze tedy materiál znovu tvářet. K deformaci zrn dochází ve směru tváření, což se následně projevuje anizotropií mechanických vlastností materiálu v různých směrech. [8]



Obr. 6 – Změna tvaru zrn před a po tváření za studena [8]

Velkou výhodou tváření za studena je dosažení velkých přesností rozměrů, dále vysoká kvalita povrchu dílů a zlepšení mechanických vlastností vlivem zpevnění zrn materiálu. Na kvalitu povrchu má vliv samotný proces tváření, protože nedochází ke vzniku okují (oxidů železa), kterými by byl povrch narušován. Nevýhodou je použití velkých tvářecích sil, nerovnoměrnost zpevňování materiálu a omezená tvářitelnost materiálu. [8]

Při tváření za studena se nemění fázové ani strukturní složení, mění se pouze tvar a uspořádání strukturních složek, což vede ke změně mechanických a fyzikálních vlastností. Jednotlivá zrna se zplošťují vlivem tvářecích sil a natahují se ve směru deformace. Intenzivnější deformace se projevují na měkkých fázích (austenit, ferit), zatímco tvrdé karbidy a případné vměstky jsou deformovány méně. Deformace tvrdých fází se projevuje až při vyšších velikostech deformace. [8]

Se zvyšující se hodnotou deformace rostou pevnostní a zároveň klesají plastické vlastnosti. Pro tváření se využívá tvářecích křivek, které definují deformační odpory kovu a umožňují stanovit velikost tvářecích sil. Menší zpevnění nastává v oblasti malých deformací, což je způsobeno malým počtem aktivních skluzových systémů a nižším počtem reagujících dislokací. Při velkých deformacích je aktivní velké množství dislokací, čímž

dochází k intenzivnímu zpevnění. Principem zpevnění je omezení pohybu dislokací. Omezení pohybu dislokací způsobují např. hranice zrn, vměstky nebo vyloučené částice.

U materiálů tvářených za studena dochází k projevům anizotropie v podélném i příčném směru. Podélný směr vyniká plastickými vlastnosti, klesají však pevnostní vlastnosti, což je způsobeno vlivem deformační textury (orientace strukturních fází a vměstků). V příčném směru se chování materiálu projevuje obráceně. [8]

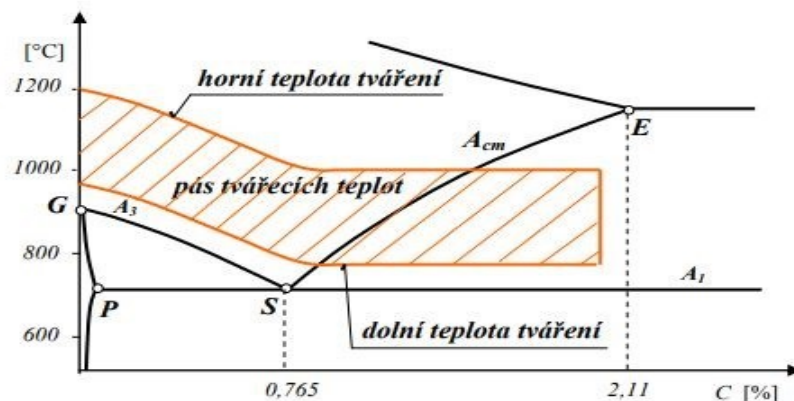
Mezi základní technologie tváření za studena patří stříhání, ohýbání, tažení.

1.2.2 Tváření za tepla

Tváření za tepla probíhá při teplotě vyšší než je teplota rekrystalizace pro tvářený materiál. Běžně se uvádí teplota nad 70 % teploty tání kovu. Na rozdíl od tváření za studena zde dochází k velmi malému deformačnímu zpevnění. Jednotlivé atomy jsou od sebe značně vzdáleny, tím se snižuje vzájemná přitažlivost atomů a roste plasticita, což se projevuje značným snížením tvářecích odporů a tím i snížením tvářecích sil.

Tváření ocelí se pohybuje v pásu teplot, který je ohraničen horní a dolní mezí tváření. Během procesu tváření za tepla je nutné udržet teplotu materiálu mezi těmito dvěma hranicemi. Teplota by měla být vyšší o 50 °C – 70 °C nad teplotu A_{c1} , respektive A_{c3} . Udržení materiálu v pásu teplot je zárukou dosažení jemnozrné struktury. Pokud by teplota měla klesnout pod pás tvářecích teplot, je nutné tvářet s přihřátím. Cílem je provést tváření pouze na jedno ohřátí (zamezení ztráty materiálu opalem). [9]

Nevýhodou může být vznik nekvalitního povrchu vlivem okují (oxidů železa) vznikajících při tváření za tepla. Vlivem vysoké teploty může docházet k hrubnutí (růstu) austenitického zrna. Další nevýhodou je vznik vláknité struktury, kterou nelze odstranit dalším zpracováním, což má značný vliv na mechanické vlastnosti.



Obr. 7 – Pás teplot pro tváření za studena u uhlíkových ocelí [9]

1.2.3 Objemové tváření

Působením sil dochází ke značné změně tvaru a zvětšení plochy polotovaru. Při objemovém tváření dochází k deformaci ve 3 osách souřadného systému. Tváření se provádí primárně za tepla. Mezi základní operace, které spadají pod objemové tváření, patří volné a zápusťkové kování, válcování, protlačování a tažení. [10]

Pomocí válcování za tepla lze připravovat profily různých tvarů, vyrábět kolejnice, plechy, desky, čtvercové nebo kruhové tyče, které jsou polotovarem pro další oblasti výroby. Pro úpravu polotovarů se dále využívá válcování za studena, které slouží ke zpevnění kovu a zvýšení tvarové a rozměrové přesnosti. Válcování za studena zlepšuje i kvalitu povrchu plechů. Takto připravené díly se využívají pro vnější panely a různé části výrobků od automobilů, spotřebičů až po interiérové díly. [11]

V případě kování se jedná o jednu z nejstarších technologií tváření kovových materiálů. V dnešní době se technologie využívá pro výrobu automobilových a leteckých součástí jako jsou klikové hřídele, ojnice, turbíny. Kování se využívá nejen pro výrobu konečných součástí, ale i pro výrobu polotovarů pro další zpracování. Pro kusovou výrobu lze využít volné kování, ve většině procesů výroby se však jedná o sériovou výrobu, proto se zhotovují vhodné kovací formy nebo kovádla bucharů, které umožňují vysokou produkci dílů. [11]

Mezi další způsob objemového tváření patří extruze, kde se vlivem působící síly materiál protlačuje profilovaným otvorem zápusťky. V případě přímé extruze se kovový materiál protlačuje jedním nebo více profilovanými otvory za pomoci vytlačovacího beranu. U přímé metody lze vytlačovat plný i profilovaný průřez. V případě nepřímé metody proniká beran do objemu kovu, čímž je zpětně vytlačován proti pohybu beranu. Extruze kovů se provádí za tepla. Běžně se extruduje hliník, hořčík, měď nebo slitiny oceli. Nejčastěji využívaným materiálem je hliník. [11]

Základem technologie tažení je protahování požadovaného průřezu skrze tažnou hlavu, čímž dochází k redukci průřezu profilu. Tažení se využívá pro výrobu tyčí a drátů. Princip těchto dvou technologií je stejný, liší se však podmínky a průměry vstupujících polotovarů. Lze produkovat polotovary s plným i dutým průřezem. [12]

Při tažení tyčí je vstupním polotovarem tyč velkého průřezu a omezené délky, což neumožňuje provádět operaci kontinuálně. Dráty jsou taženy z cívek, které se produkují v různých délkách, proto lze proces tažení drátu považovat za kontinuální. [11]

2 TECHNOLOGIE PLOŠNÉHO TVÁŘENÍ

Technologie plošného tváření patří k nejnehospodárnějším, nejproduktivnějším a nejprogresivnějším výrobním metodám. Tváření patří do oblasti beztržiskových technologií a lze vyrobit součásti rozmanitých tvarů a rozměrů, které jsou zároveň velmi přesné. Během tváření je materiál účinkem vnějšího zatížení uveden do plastického stavu, ve kterém mění svůj tvar i vlastnosti, a je přetvořen do konečné podoby výrobku bez porušení jeho soudržnosti. Nástroje pro tváření jsou ekonomicky nákladné a jejich hospodárné využití má význam až v sériové výrobě, kdy je pořizovací cena nástroje kompenzována velkou produktivitou výroby a nízkými provozními náklady. [13]

Plošné tváření se od objemového liší převážně tím, že se znatelně mění tvar, zatímco průřez se mění jen minimálně. Materiál si zároveň zachovává původní mechanické vlastnosti. Jako polotovary pro plošné tváření se používají plechy a pásy. Plošné tváření plechů lze dále dělit na stříhání, ohýbání a tažení.

Tvářené materiály jsou omezené schopností snášet plastické (trvalé) deformace, které se za určitých podmínek pro různé materiály mění. Reakce materiálu na působení zatěžující síly vyplývá z velikosti zatěžující síly, vlastností tvářeného materiálu a podmínek zatěžování. Je ovlivněna chemickým složením, okolními podmínkami a způsobem zatěžování. Podstatný vliv má vnitřní stavba materiálu. Proces tváření začíná po překročení meze pružnosti, kdy dochází k plastické deformaci. Při tomto procesu se ovšem nesmí překročit mez pevnosti. Pro tváření se volí materiály, které mají meze pevnosti a pružnosti co nejdále od sebe. [14]

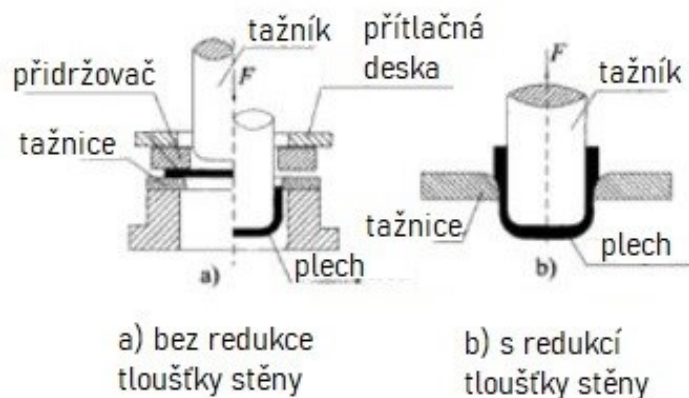
2.1 Hluboké tažení plechů

Tažení je proces, kde je využito tažníku k vytvarování rovinného plechu tokem materiálu mezi povrchem tažníku a tažnice. Přístřih je formován do válcového, kuželovitého, obdélníkového či jiného obecného tvaru. Touto technologií je možné produkovat konečné výtažky s použitím minimálního počtu operací, tvorbou minimálního množství odpadu a většinou bez dalších přídavných operací. [15]

Rozvoj specifických metod hlubokého tažení je úzce spojen s technologickým vývojem obzvláště v automobilovém a leteckém průmyslu. Lze vyrábět díly různých tvarů a rozměrů pro rozmanité výrobky od velmi malých dílů v elektronickém

průmyslu až po rozměry několika metrů v těžkých průmyslových odvětvích. Životnost tažných nástrojů je velmi vysoká, což se pozitivně promítá do ceny výrobku. [16]

Pomocí hlubokého tažení plechů lze vyrábět díly s nízkou hmotností a zároveň vysokou pevností. Lze vyrábět složité díly, které nelze produkovat pomocí jiných dostupných technologií výroby. Technologie hlubokého tažení plechů umožňuje výrobu různými způsoby. První možností je hluboké tažení bez redukce tloušťky stěny plechů, u kterého nedochází ke změně tloušťky dílu. Druhou možností je hluboké tažení s redukcí tloušťky vyráběného dílu (nejčastěji se liší tloušťka stěny a dna). [17]



Obr. 8 – Hluboké tažení plechů [17]

Dále lze tažení rozdělovat z hlediska počtu provedených operací na jedno operační tažení nebo více operační tažení, které je prováděné u složitějších výlisků a součástí s velkým stupněm přetvoření. [16]

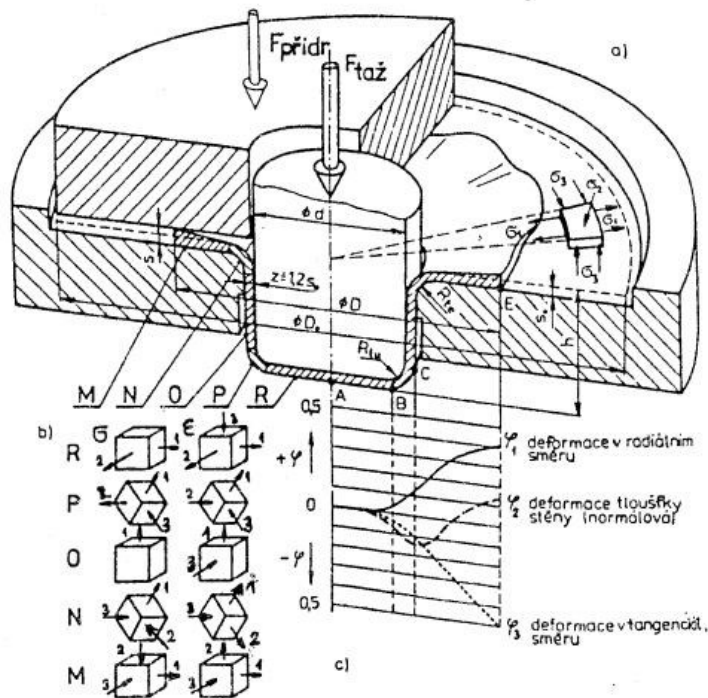
Hluboké tažení plechů je jednou z nejrozšířenějších technologií nejen pro výrobu širokého množství dílů, ale i pro jednoduché zkoušení plechů. Typickým příkladem dílů jsou hrnce, pánve, dřezy, nápojové plechovky nebo automobilové a letadlové panely. [17]

Pro technologii tažení se z tvářecích strojů používají mechanické lisy dvojčinné i více činné, lisy postupové, lisy hydraulické nebo speciální zařízení. [16]

2.1.1 Tažení válcového výtažku

Vzhledem k tomu, že při tvorbě válcového výtažku dochází ke změnám napětí a deformace v jednotlivých částech výtažku, je nutné tento princip vysvětlit. Na Obr. 9 je vysvětlen princip tažení válcového výtažku s přidržovačem, na kterém jsou vyznačena schémata hlavního napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$), a také průběhy logaritmické deformace ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$).

V přírubě výtažku (oblast M) vzniká vlivem přidržovače prostorová napjatost. Na poloměru tažnice R_{te} (oblast N) vzniká prostorová napjatost s největším radiálním tahovým napětím σ_1 a malým tangenciálním tlakovým napětím σ_3 . Ve válcové části výtažku (oblast O) existuje pouze jednoosá tahová napjatost a prostorový stav deformace z oblasti příruby se zde mění na rovinný stav. V místě výtažku, nacházejícího se v přechodu válcové části ve dno (Oblast P), je prostorová nestejnorodá napjatost, jenž způsobuje značné prodloužení, a tím ztenčení tloušťky stěny výtažku. V této oblasti dochází nejčastěji k utržení dna výtažku. Ve dnu výtažku (oblast R) vzniká během tažení rovinná tahová napjatost a prostorový stav deformace. V případě jedno operačního tažení je zeslabení stěny dna výtažku zanedbatelné. Při více operačním tažení dochází k intenzivnímu zeslabení dna. [16]



Obr. 9 – Tažení válcového výtažku; a) – schéma nástroje;
 b) – hlavní napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) a deformace ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$);
 c) – průběh logaritmické deformace ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) [16]

Jedním z nejdůležitějších parametrů je tažná síla $F_{taž}$, která vyvolává v plášti výtažku tahové napětí. Výsledné tahové napětí σ_v je dáno pro případ 1. tažení, kdy vzniká válcový prolis a jeho částečné protažení tažníkem přes tažnici, vztahem: [16]

$$\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_{tř} + 2\sigma_0) \cdot e^{\mu \cdot \alpha} \text{ [MPa]} \quad (2)$$

Pro 2. fázi tažení, kdy se tvoří plášť a pokračuje dokončení výtažku ($\alpha = 90^\circ = \frac{\pi}{2}$ a tedy $\sin \alpha = 1$) je dáno vztahem: [16]

$$\sigma_v = (\sigma_1 + \sigma_{\text{tř}} + 2\sigma_o) \cdot e^{\mu \frac{\pi}{2}} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

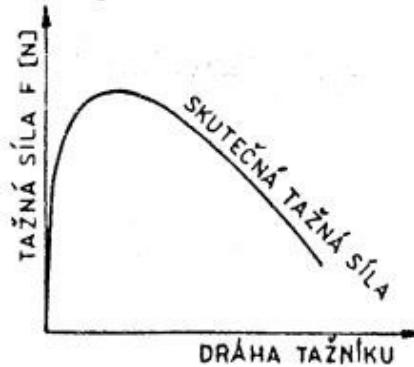
- σ_v – výsledné tahové napětí [MPa]
- σ_1 – radiální tahové napětí, které vzniká v oblasti příruby výtažku [MPa]
- $\sigma_{\text{tř}}$ – napětí vyvolané třením od tlaku přídržovače na zesilující se okraj přístříhu [MPa]
- σ_o – napětí vyvolané ohybem přístříhu na zaoblené hraně tažnice, $2\sigma_o$ značí dvojí ohyb (ohyb a narovnání) [MPa]
- $e^{\mu \cdot \alpha}$ – součinitel vyjadřující vliv tření na zaoblené hraně tažnice [-]
- μ – součinitel tření [-]
- α – úhel ohybu (opásání) plechu na tažné hraně, pro $\alpha = 90^\circ$ je $e^{\mu \cdot \alpha} = 1 + 1,6 \mu$ [-]

Pomocí výsledného napětí σ_v lze vypočítat velikost tažné síly pro válcový výtažek ze vztahu: [16]

$$F_{\text{taž}} = \pi \cdot d \cdot s_o \cdot \sigma_v \text{ [N]} \quad (4)$$

- $F_{\text{taž}}$ – tažná síla [N]
- π – Ludolfovo číslo π [-]
- d – průměr výtažku [mm]
- s_o – výchozí tloušťka plechu [mm]
- σ_v – výsledné tahové napětí [MPa]

Výsledné tahové napětí σ_v se v průběhu tahu mění, což znamená, že se mění i výsledná velikost tažné síly. V praxi se může stát, že průběh tažné síly je odlišný, než udává Obr. 10. Důvodem změny může být nedodržení optimální tažné vůle. [16]



Obr. 10 – Průběh tažné síly [17]

V praxi se pro urychlení výpočtu maximální tažní síly (síla na utržení dna) využívá zjednodušený empirický vzorec. Vzorec lze použít pro rychlou kontrolu jmenovité síly lisu.

$$F_{\text{taž}} = C \cdot \pi \cdot d \cdot s_0 \cdot R_m \quad [N] \quad (5)$$

- $F_{\text{taž}}$ – tažná síla [N]
- c – součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení m s přihlédnutím k poměrné tloušťce s_0/D_0 [-]
- π – Ludolfovo číslo π [-]
- d – průměr výtažku [mm]
- D_0 – počáteční průměr přístřihu [mm]
- s_0 – výchozí tloušťka plechu [mm]
- R_m – mez pevnosti plechu [MPa]

Hodnoty m vyjadřují poměr průměru výtažku d k počátečnímu průměru přístřihu D_0 . V závislosti na poměru m se volí součinitel c , který je dále využit do vztahu pro výpočet tažné síly $F_{\text{taž}}$.

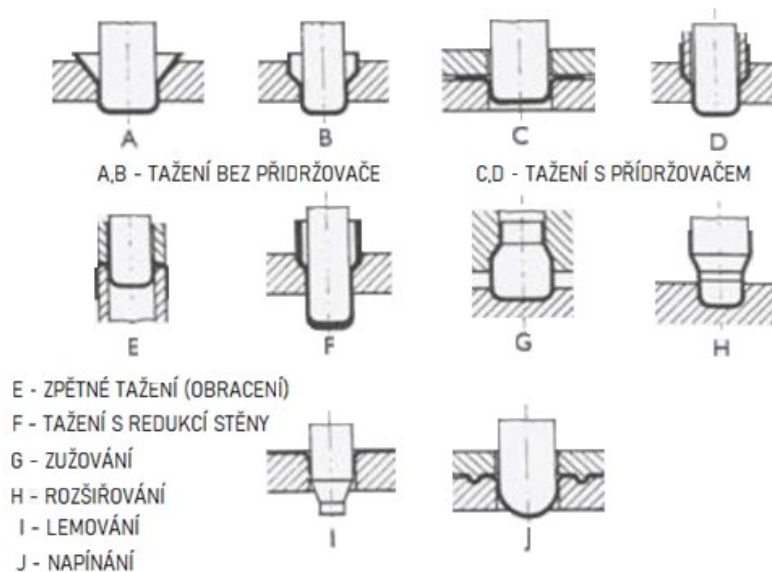
$m = d/D_0$	0,55	0,6	0,65	0,7	0,8
c	1	0,86	0,72	0,6	0,4

Obr. 11 – Vybrané hodnoty součinitele c [16]

2.1.2 Způsoby tažení plechů

Mezi způsoby hlubokého tažení plechů patří technologie prostého tažení válcových výtazků s přidržovačem nebo bez přidržovače, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, žlábkování, protahování, rozšiřování nebo zužování. [18]

Jednotlivé technologie hlubokého tažení jsou na Obr. 12 znázorněny pomocí schémat pro provedení operací.



Obr. 12 – Technologické způsoby tažení [19]

Výrobek zhotovený tažením nemusí být pouze rotační, lze vyrábět i nerotační tvary, případně nesymetrické výrobky. U těchto složitějších aplikací se však využívají odlišné výpočtové vztahy jednotlivých parametrů, tažení probíhá na více operací, upravují se nástroje a celkový proces je značně složitější.

2.2 Parametry hlubokého tažení válcových výtazků bez ztenčení stěny

Pro dosažení požadované přesnosti při výrobě plechových dílů pomocí tažení je nutné dodržet nezbytné technologické a konstrukční zásady. Správnost výroby dále obnáší volbu vhodného plechu pro tažení, použití maziv a výběr vhodného lisu.

2.2.1 Velikost přístřihu plechu

Předpokladem pro výpočet velikosti přístřihu pro tažení bez ztenčení stěny je zachování objemu materiálu a tloušťky plechu. U tenkých plechů se uvažuje vnější rozměr výtazku, u plechů s větší tloušťkou stěny se počítá s rozměrem střední tloušťky stěny plechu. Přístřih plechu se zvětšuje s ohledem na problém cípovitosti plechu o 3% pro jednostupňové

tažení a následně o 1 % pro každý další tah. Pro jednoduchý válcový výtažek bez příruby lze uvažovat vztah: [16]

$$D_o = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} \text{ [mm]} \quad (6)$$

- D_0 – velikost přístřihu plechu pro válcový výtažek bez příruby [mm]
- d – vnitřní průměr výtažku [mm]
- h – minimální výška výtažku [mm]

Rovnice (6) zanedbává zaoblení dna a platí pouze v rozsahu (3 – 8 násobek tloušťky). Složitost vztahů se mění s náročností tvaru výtažku. V literatuře lze najít vztahy pro výpočet složitějších tvarů výtažků.

2.2.2 Určení způsobu tažení

Na způsob tažení má vliv využití přidržovače. Dle Friedlingova vztahu se využití přidržovače posuzuje ze vztahu poměrné tloušťky dle poměru přístřihu plechu D_0 a tloušťky přístřihu plechu s_0 . Pokud je poměr $\Delta s < 1,5$, je nutné využít přidržovač, pokud je hodnota $\Delta s > 2$, není nutné přidržovač využít.

Další možnost volby přidržovače je definována vztahem:

$$\alpha = 50 \cdot \left(z - \frac{\sqrt{s_0}}{3 \cdot \sqrt{D_0}} \right) \quad (7)$$

- α – koeficient pro použití přidržovače [-]
- z – materiálová konstanta (pro hlubokotažný plech $z = 1,9$) [-]
- s_0 – tloušťka přístřihu plechu před tažením [mm]
- D_0 – průměr válcového přístřihu plechu [mm]

Pokud je hodnota α menší dle rovnice 8, lze táhnout bez přidržovače, pokud je tato hodnota větší nebo rovna, je nutné táhnout s přidržovačem. Plechy s tloušťkou menší než 0,5 mm je nutné táhnout vždy s přidržovačem. [16]

$$\alpha < 100 \cdot \frac{d}{D_0} \quad (8)$$

- α – koeficient pro použití přidržovače [-]
- d – průměr výtažku [mm]
- D_0 – průměr přístřihu plechu [mm]

Síla přidržovače se stanoví jako:

$$F_p = S_c \cdot p \quad [N] \quad (9)$$

- F_p – síla přidržovače [N]
- S_c – činná (funkční) plocha pod přidržovačem [mm²]
- p – měrný přidržovací tlak [MPa]

Doporučené hodnoty měrných tlaku přidržovače se pohybují mezi 1 – 3 MPa. Pro ocelový hlubokotažný plech se udává hodnota 2,0 – 3,0 MPa. Měrný tlak je závislý na tloušťce plechu. [16]

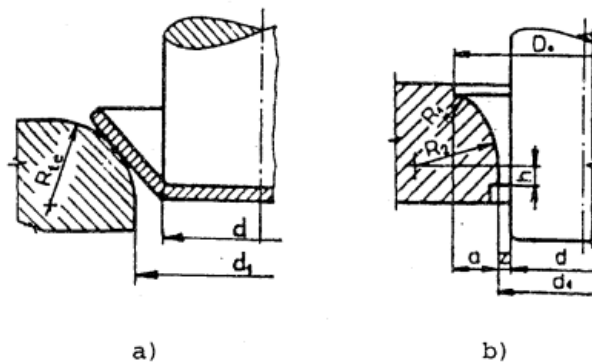
2.2.3 Geometrie a tvar funkčních částí nástrojů

Nejdůležitějšími parametry při návrhu nástrojů je poloměr zaoblení tažnice, profil tažníku a velikost tažné mezery.

Zaoblení hrany tažnice R_{te}

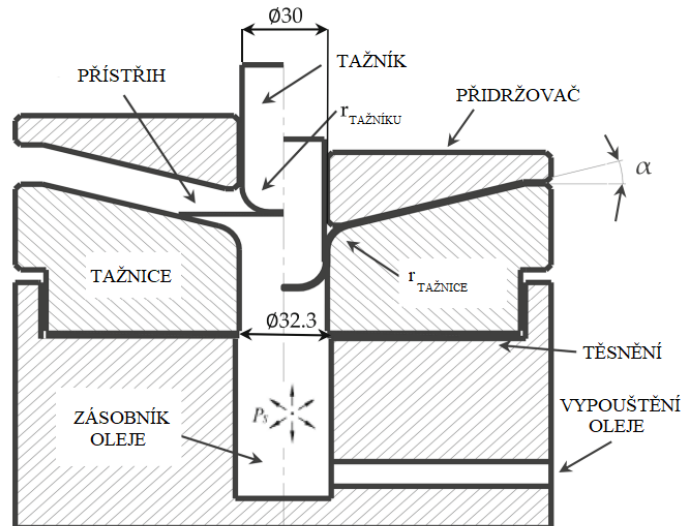
Zaoblení tažnice závisí na způsobu tažení a na velikosti a tloušťce přístřihu plechu. Zaoblení tažnice R_{te} pro jedno operační tažení se pohybuje mezi hodnotou 6x – 10x tloušťka plechu S_0 . Pro různé typy výrobků lze využít stanovení poloměru zaoblení tažnice odečtem z doporučených grafů. [16]

S rostoucí hodnotou zaoblení tažnice R_{te} klesá plocha pod přidržovačem, což vede ke vzniku defektů na výtažku. Vyšší hodnota umožňuje zvýšit hloubku a stupeň tažení na jednu operaci. Úprava se provádí z důvodu dosažení větší deformace, čímž vzroste i hodnota součinitele deformace.



Obr. 13 – Tažnice - a) hrana tažnice s velkým zaoblením, b) hrana tažnice vytvořená evolventní křivkou místo ostré hrany tažnice [16]

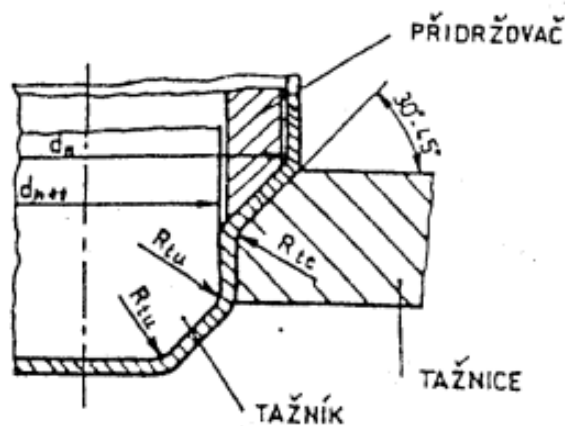
Pro různé tvary výtažků se využívá odlišných tvarů otvorů tažnic. Závisí na průměru tažnice, zaoblení, zkosení nebo případném osazení vnitřního otvoru. Všechny parametry ovlivňují schopnost a kvalitu procesu tažení.



Obr. 14 – Provedení otvoru tažnice [20]

Zaoblení hrany tažníku R_{te}

Zaoblení hrany tažníku se pro první tah neodlišuje od poloměru zaoblení u tažnice. Pro poslední tah se hodnoty zaoblení tažníku odvíjejí dle velikosti průměru výtažku. Pro průměr výtažku 10 – 100 mm se hodnota zaoblení R_{te} pohybuje v rozsahu ($3x - 4x$ tloušťka plechu S_0). Pro postupové tahy u výtažků do průměru 60 mm se využívají přídržovače se zaoblením hrany dle tažníku z předchozí operace. Pro výtažky s větším průměrem se využívají přídržovače se zkosenými hranami pod úhlem $30^\circ - 45^\circ$. Úprava se týká i tažníku, který odpovídá tvaru přídržovače. [16]



Obr. 15 – 2. tažení pro průměr výtažku větší než 60 mm [16]

Tažná mezera

Jedná se o mezeru mezi tažníkem a tažnicí. Velikost tažné mezery se volí dle tloušťky plechu a je nutné, aby byla větší, než je největší tloušťka plechu. Pokud je rozměr tažné mezery menší, dochází ke zvýšení tažné síly, což se může projevit utržením dna výtažku v průběhu hlubokého tažení. Pokud je šířka mezery příliš velká, dochází k tvorbě tzv. sekundárních vln. Tyto vlny jsou v oblasti stěny výtažku, což je nežádoucí.

Pro první tah se doporučuje hodnota tažné mezery z jako tloušťka plechu zvýšená o velikost 20 – 30 % tloušťky plechu, a pro další operace se mezera zvyšuje v rozsahu 10 – 20 % tloušťky plechu. [16]

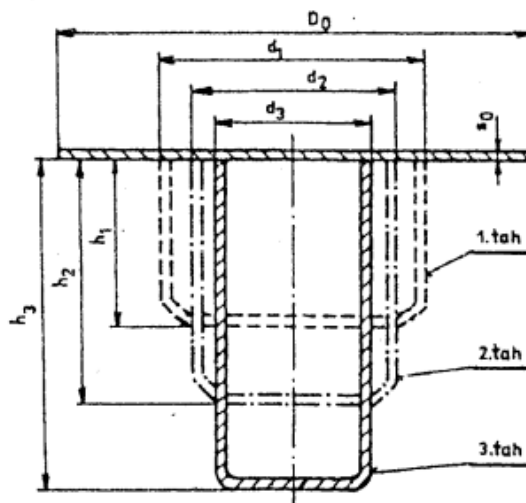
Počet tažení

Počet tažení se odvíjí od tvaru výtažku, kde hlavním parametrem je minimální průměr. Pokud je nutné vytvořit menší průměr, vyžaduje výtažek zařazení více operací. Potřebný počet tažných operací je dán součinitelem tažení:

$$m_n = \frac{d_n}{D_0} [-] \quad (10)$$

- m – součinitel tažení [-]
- d_n – průměr výtažku po x tažení [mm]
- D_0 – průměr přístříhu plechu před tažením [mm]

Součinitel tažení udává mezní hodnotu přetvoření pro danou operaci. Mezní hodnota, kterou lze dosáhnout po prvním tahu pro hlubokotažné plechy bez přidržovače



Obr. 16 – Schéma tažení válcového výtažku na 3 operace [16]

$m_1 = 0,48 - 0,50$, pro druhé tažení $m_2 = 0,73 - 0,75$, pro třetí tah $m_3 = 0,76 - 0,78$. Po třetím tahu se v tomto případě musí provést rekrytalizační žihání, protože klesá schopnost redukce materiálu vlivem zpevnění. Součinitel tažení ovlivňuje druh a kvalita plechu, tloušťka a poměrná tloušťka plechu, geometrie tažníku a tažnice, podmínky tažení nebo použité technologie tažení. Potřebný počet operací se odvíjí od hodnoty celkového součinitele tažení m_n . [16]

2.3 Parametry hlubokého tažení válcových výtažků se ztenčením stěny

Pokud je nutná rozdílná tloušťka stěny a dna výtažku, využívá se tažení s redukcí tloušťky stěny. Tloušťka plechu se redukuje v tažné mezeře mezi tažníkem a tažnicí, která je menší, než původní tloušťka přístřihu. Tloušťka dna se při tažení nemění. Polotovar pro tento typ operace je kalíšek, který se vyrábí tažením bez redukce tloušťky stěny.

Počet tažných operací

Počet operací je závislý na typu materiálu a velikosti deformace. Velikost deformace je dána vztahem: [16]

$$\varepsilon = \frac{s_{n-1} - s_n}{s_{n-1}} \cdot 100 = (1 - K_S) \cdot 100 [\%] \quad (11)$$

- ε – poměrná deformace [%]
- s_{n-1} – plocha příčného průřezu po n-1 operaci [mm²]
- s_n – plocha příčného průřezu po n-té operaci [mm²]
- K_S – součinitel ztenčení tloušťky stěn výtažku [%]

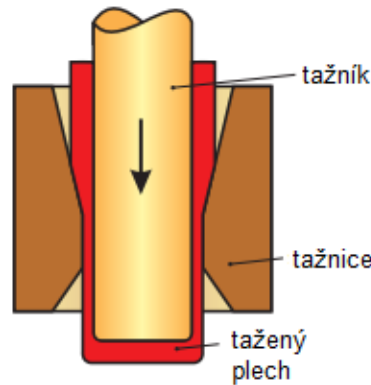
$$K_S = \frac{s_n}{s_{n-1}} \cdot 100 [\%] \quad (12)$$

Stejně jako pro tažení bez ztenčení stěny se zde vyskytuje součinitel tažení m . Součinitel tažení m je dán vztahem: [16]

$$m_n = \frac{s_n}{s_{n-1}} [-] \quad (13)$$

- m_n - součinitel tažení [-]
- s_n – tloušťka stěny pro n-tou operaci tažení [mm]
- s_{n-1} – tloušťka stěny pro n-1 operaci tažení [mm]

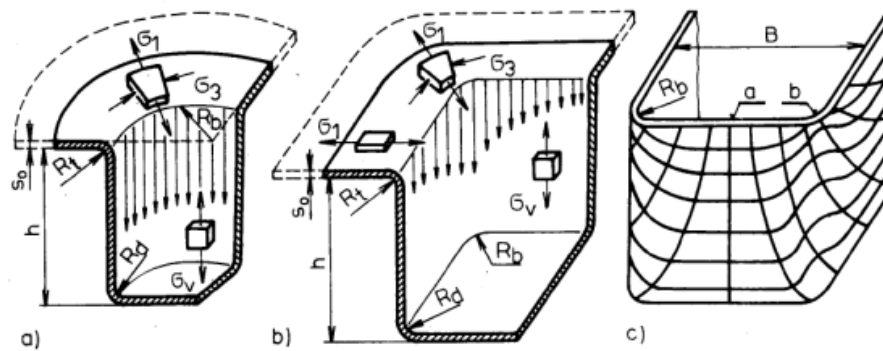
Výhodou tažení se ztenčením stěny je dosažení vyššího stupně deformace a snížení počtu operací oproti tažení bez ztenčení stěny. Nevýhodou může být zařazení tepelného zpracování po každé operaci vzhledem k vyšší hodnotě deformace. [21]



Obr. 17 – Tažení se ztenčením stěny [21]

2.4 Výtažek nerotačního tvaru

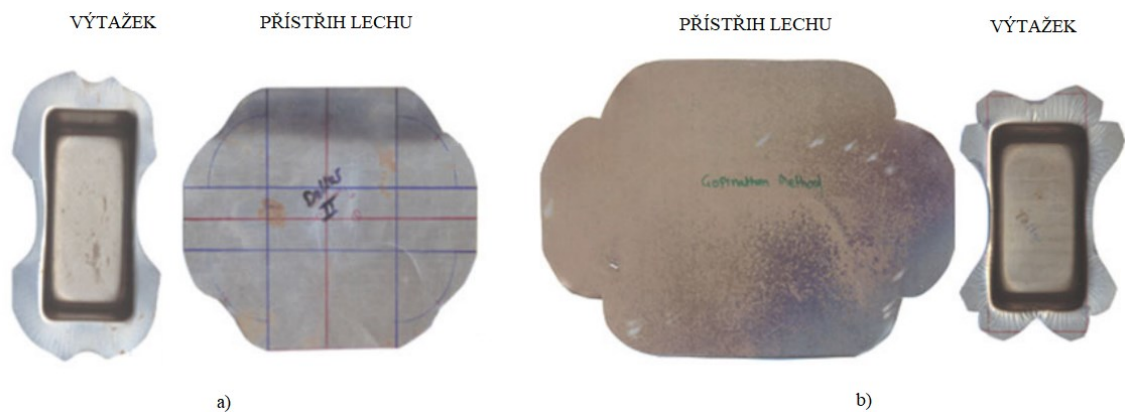
Poměrně velkou část hlubokého tažení tvoří tažení nerotačních tvarů, jako jsou obdélníkové nebo čtvercové průřezy, dále pak lze táhnout i nesymetrické průřezy. Základním rozdílem v tažení nerotačních výtažků je působící napětí podél tažné hrany. Podobnost napětí lze nalézt v rozích výtažku, avšak na rovných stěnách je napětí odlišné. K tažení dochází pouze v rozích výtažku, zatímco stěny se tvoří pouhým ohybem. Vzhledem k charakteru namáhání jsou kladeny značné nároky nejen na konstrukci, ale i na kvalitu nářadí pro hluboké tažení.



Obr. 18 – Porovnání napětí a) válcového výtažku, b) nerotačního výtažku; c) zobrazení deformace sítě v rozích nerotační čtvercové nádoby [18]

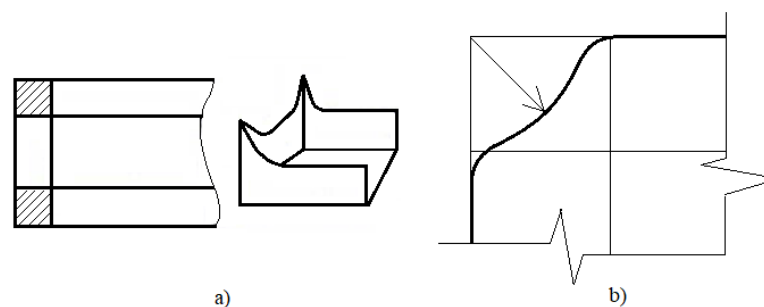
2.4.1 Určení přístřihu

Určování přístřihu je značně složitější než u jednoduchého válcového výtažku. Vychází se z rovnosti objemů polotovaru a konečného výtažku. Důvodem složitosti je nerovnoměrné přetvoření podél obvodu. Pro přístřih nelze přidat rovnoměrně stejný přídavek materiálu jako v případě tažení válcového výtažku, protože by nebylo možné dosáhnout požadovaných tvarů. Přístřih je nutné správně definovat, aby došlo k přemístování materiálu pomocí tažení. U čtvercových tvarů se ubírá materiál v rozích, který představuje množství kovu, které se při tažení přemísťuje. Přístřih nelze určovat pomocí zkoušení kvůli značnému prodloužení výroby, takže se dnes využívá primárně softwarových metod pro co nejpřesnější určení přístřihu.



Obr. 19 – Návrh přístřihu s následným porovnáním výtažků; a) optimální přístřih; b) špatně navržený přístřih (vznik defektů) [22]

V případě, že by nebyl zvolen vhodný tvar přístřihu a byl by použit pouze obdélníkový průřez, došlo by v rozích ke vzniku cípů.



Obr. 20 – a) obdélníkový průřez způsobí vznik cípů v rozích; b) správný tvar přístřihu plechu [19]

Správný tvar přístřihu plechu je vyřešen pomocí zaoblení hlavní plochy a zaoblení rohů pomocí rádiusů. Velikost zaoblení se odvíjí dle požadovaných tvarů výrobků.

2.4.2 Počet tažných operací

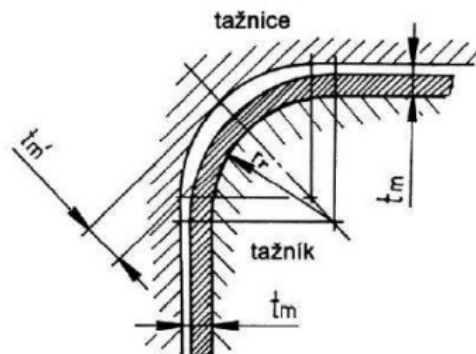
Počet tažení pro nerotační výtažky je dán zaoblením v rozích nádoby, což značně ovlivňuje maximální výšku tažení v jednom kroku. S výhodou se využívá pro první tažení zaoblení výtažku a následně se v další operaci vyrovná do požadovaného tvaru. Zaoblení při prvním tažení zlepšuje podmínky tažení, protože dochází i k tažení materiálu a nejen k ohýbání. Součinitel tažení se podobá tažení rotačních výtažků a je dán vztahem:

$$m = \frac{r_i}{R_o} [-] \quad (14)$$

- m – součinitel tažení $m [-]$
- r_i – poloměr zaoblení výtažku [mm]
- R_o – redukovaný poloměr přístřihu [mm]

2.4.3 Tažná mezera pro nerotační výtažky

Velikost tažné mezery se v rozích udává větší než na stěnách, aby nedocházelo k zeslabení materiálu, a tím ke snížení pevnosti. Pro první tažení je mezera větší než pro následující operace tažení stejně jako u rotačních válcových výtažků. [23]

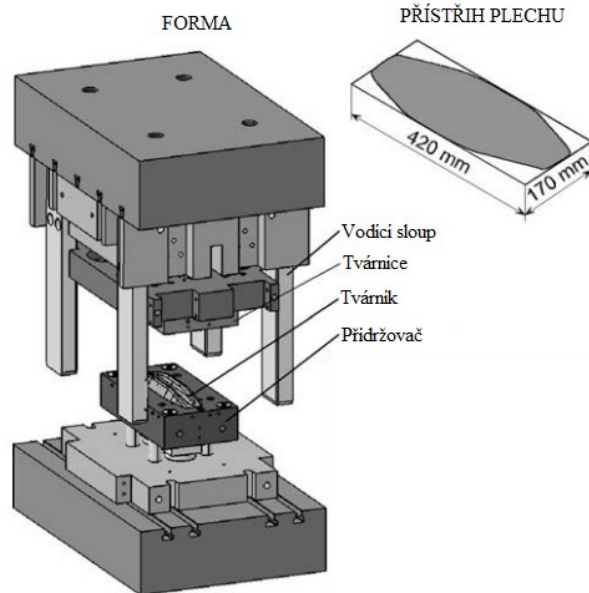


Obr. 21 – Tažná mezera pro čtyřhranný výtažek [23]

2.5 Nástroje pro tažení

Nástroje pro tažení se vyrábějí v různých tvarech podle složitosti výrobku. Hlavními částmi jsou tvárník, tvárnice, případně přidržovač přístřihu plechu. Nástroje se tvarově upravují pomocí vložek nebo lze využít brzdících žeber, které se používají při výrobě složitých dílů v důsledku nerovnoměrné deformace tažení. Při tažení složitých dílů bez brzd dochází ke zvlnění míst plechu vlivem ztráty stability. Brzdící žebra zamezí zvlnění, zvýší využitelnost plechu při tažení a zlepšují průběh tažení pro složité oblasti, kde by mohlo docházet k praskání plechu.

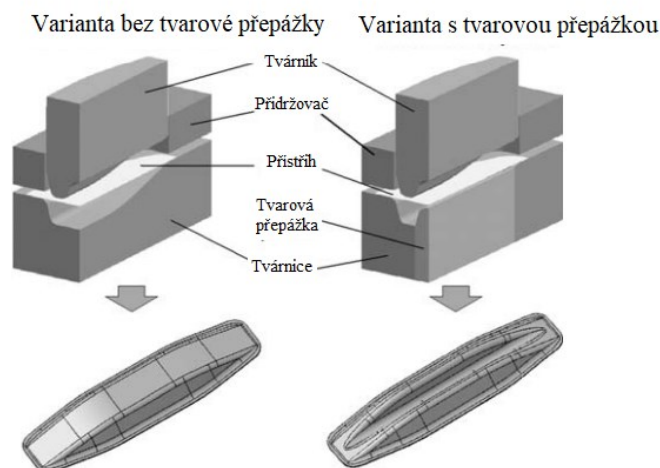
Schéma sestavy nástroje pro hluboké tažení znázorňuje Obr. 22, na kterém se nachází dvě strany formy. Z pohledu formy je ve spodní části umístěn tvárník s přídržovačem plechu a v horní části se nachází tvárnice. Na sestavě formy je znázorněn tvárník, tvárnice, přídržovač a vodící sloupy. Forma je temperována pomocí vody. [24]



Obr. 22 – Forma pro hluboké tažení [24]

Stejně jako v případě vstřikovací formy je i ve formě pro hluboké tažení nejdůležitější vnitřní dutina, která dává výrobku potřebný tvar. Tvárník je pozitivním tvarem a tvárnice negativním tvarem požadovaného výrobku. Na kvalitu výroby mají vliv nejen použité procesní podmínky, ale především kvalita tvárníku a tvárnice. Součástí zařízení pro složitější výrobky bývají i prvky pro děrování a ořezávání tvaru.

Tvárnici lze opatřit pomocí tvarových přepážek pro výrobu většího množství tvarů u jednoho typu výrobku. [24]



Obr. 23 – Úprava tvárnice pro variabilitu procesu [24]

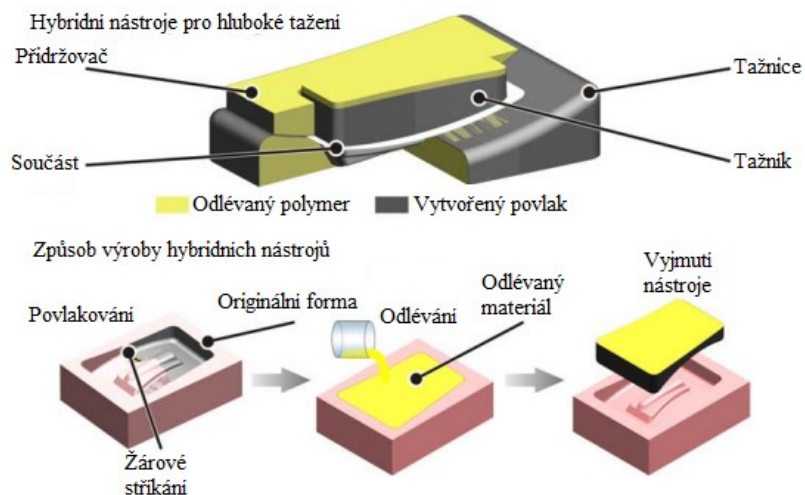
V případě výroby jednoduchých válcových kalíšků se nástroje značně liší geometrií a jsou velmi jednoduché. Nástroje byly využity pro výzkum vlivu zaoblení tvárníku a tvárnice na hluboko tažnost u hliníkové slitiny AW6016-T4. [25]



Obr. 24 – Nástroje pro jednodušší aplikace hlubokého tažení [25]

2.5.1 Materiál nástrojů

Materiály nástrojů jsou voleny dle použitého materiálu plechu. Pro materiály s vysokou pevností se nejčastěji využívají nástrojové oceli (např. 1.2379). Nástroje z nástrojových ocelí se následně kalí a popouští na HRC = 61 – 63. Pro vysoce legované materiály se doporučuje použití hliníkového bronzu pro tažník a tažnici. Možnost využití má i oblast keramických povlaků, které snižují adhezivní opotřebení nástrojů a zlepšují kvalitu povrchu hotového plechu. Nevýhodou keramických povlaků je však křehkost, snadnější náchylnost k praskání a vyšší cena nástroje. Nejnovější výzkumy se zabývají využitím kompozitních materiálů s kovovým povlakem na povrchu. [26]



Obr. 25 – Způsob výroby hybridních nástrojů [27]

Hybridní nástroje zhotovené z kompozitních materiálů kombinují výztužná vlákna, polymery a kovový povlak, který lze nanášet žárovým stříkáním (např. nikl). Technologie výroby je složena z žárového nástřihu niklu na formu, následného vložení výztuže a zalití vhodným materiálem. Proces je znázorněn na Obr. 25. [27]

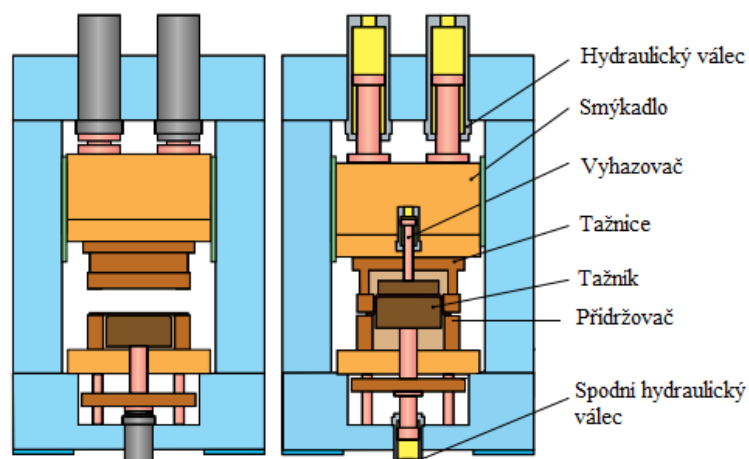
2.5.2 Stroje pro hluboké tažení plechů

Pro hluboké tažení se běžně využívají hydraulické lisy, méně využívány jsou mechanické lisy. Stroje se odlišují velikostí pracovního prostoru, tonáží nebo počtem zdvihů v časovém úseku. [28]

S výhodou se využívají hydraulické lisy, protože umožňují plynulou změnu rychlostí beranu, dosažení konstantních rychlostí beranu nebo nastavení přitlačných sil plechu. Hydraulické lisy se dělí na:

- Jednočinné.
- Dvojčinné/ Troj-činné.
- Postupové.

Dvoj a trojčinné hydraulické lisy se využívají pro hluboké tažení složitých výtažků, pro jednoduché výtažky s malou hloubkou lze využít tažné lisy jednočinné. Nejvíce využívanými lisy jsou postupové lisy, které se využívají pro sériovou výrobu. Postupové lisy umožňují kombinovat více operací v jednom kroku jako je vytažení, děrování a ostřížení tvaru. Lisy obsahují na každé pozici požadované nástroje pro zhotovení operace. Mezi jednotlivými pozicemi dochází k podávání plechu pomocí podavače, plech je držen nejčastěji pomocí pneumatického přidržovače a vyhození se realizuje vyhazovači. [28]

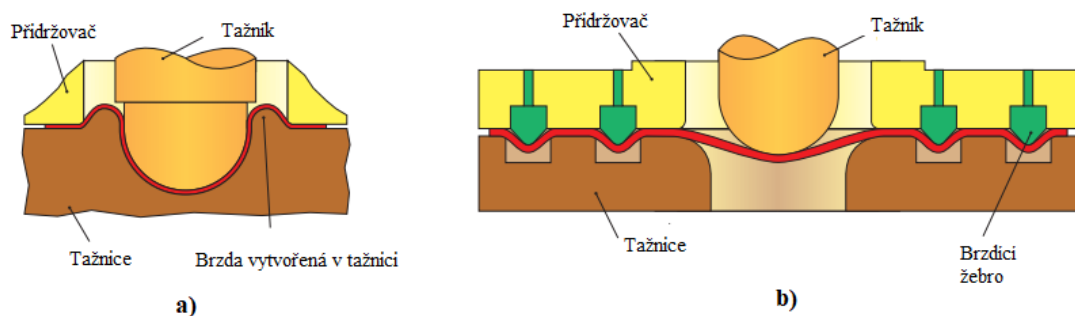


Obr. 26 – Jednočinný hydraulický lis s pomocným hydraulickým válcem [21]

2.5.3 Brzdy

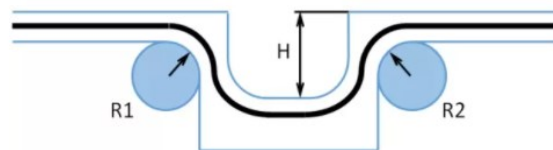
Brzdy se primárně využívají pro tažení složitých profilů a tvarů, kde hrozí utržení určité části plechu a slouží pro zvýšení využitelnosti plechu při procesu tažení. Zároveň snižují riziko vzniku vrásčitého povrchu a vyboulení. Brzdy se nastavují v kombinaci se silou přidržovače. Pomocí přidání strategie brzd do problémových míst je možné zmenšit přístřih plechu, čímž se bude materiál „táhnout více“.

Z hlediska konstrukce brzd se upravuje v jednodušších případech tvarově tažnice a případně přidržovač. U složitějších dílů jsou vkládány samostatné brzdící žebra. Rozdíl mezi jednotlivými metodami vysvětluje Obr. 27. U kruhových výtažků je brzda po celém obvodu, u nerotačních se umísťuje primárně na rovinné oblasti. [21]



Obr. 27 – a) tvarová brzda v tažnici; b) brzdící žebra [21]

Tvar brzdících lišt se liší podle požadovaného účinku brzdění a lze využívat i více brzd za sebou. V systému analýzy hlubokého tažení plechů v prostředí AutoForm lze nastavovat redukční strategie, kde se přiřazuje potřebným oblastem hodnota 0 (maximální brzda) nebo 1 (žádná brzda). [29]



Obr. 28 – Teoretický tvar brzdícího žebra [29]

2.5.4 Přidržovač

Spolu s brzdami souvisí i přidržovač. Tvar přidržovače může být rovinný nebo profilovaný, vše závisí na tvaru přístřihu plechu. Síla přidržovače se vypočítá dle rozměru přístřihu plechu, tvaru tažnice a požadovaném tlaku p , který závisí na materiálu plechu (např. $p_{\text{ocel}} = 2,5 \text{ N/mm}^2$). Pokud by byla síla přidržovače příliš vysoká, mohlo by docházet k utržení dna. Využití více činných lisů umožňuje plynule regulovat sílu přidržovače, která se v průběhu tažení mění. [21]

2.5.5 Mazání

Velmi důležitým parametrem pro kvalitu vyráběných dílů pomocí hlubokého tažení jsou lubrikanty. Výhoda lubrikantů spočívá ve snížení tření, tím i vzniklého tepla při tažení, snižuje riziko vzniku vad a lépe odvádí teplo z pracovního prostoru. Zvyšuje se životnost nástroje vlivem snížení opotřebení. Nevýhodou je prodražování procesu, nutnost volby vhodného maziva vzhledem k životnímu a pracovnímu prostředí, a v neposlední řadě se řeší způsob odstranění zbytkového maziva z hotového dílu. [30]

Maziva by měla splňovat následující podmínky:

- vytvoření souvislé mazací vrstvy odolávající teplotě a tlaku,
- přilnavost maziva k povrchu, dobrá smáčivost,
- fyzikální a chemická neutralita k procesu,
- snadná odstranitelnost z hotové součásti,
- zdravotní nezávadnost a ekologická neutralita. [21]

Z hlediska typu maziva se rozlišují:

- maziva rozpustná/nerozpustná ve vodě,
- tuhá maziva,
- fólie a laky.

Kapalná maziva jsou nejčastěji na olejové bázi a jejich složení není přesně dáno (rozdílný obsah parafinů), standardně se skládá z 95 % oleje a zbytek tvoří aditiva. Běžně lze oleje rozdělit na biologické oleje (živočišné, rostlinné), minerální nebo syntetické. Práškové vosky se využívají jako pevná maziva. [21]

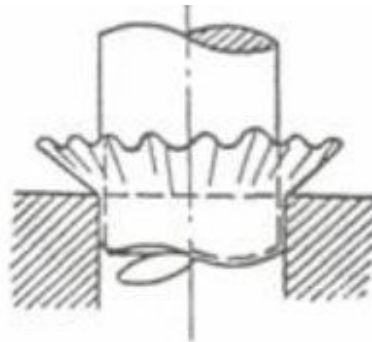
Biologické oleje jsou používány pro zachování zdravotní nezávadnosti, ale zároveň mají nízkou teplotní odolnost. Nejrozšířenější oleje jsou minerální, které odolají i vyšším teplotám. Pro nejnáročnější aplikace slouží syntetické oleje odolávající vysokým teplotám a tlakům. [31]

Vlastnosti maziv lze upravovat pomocí aditiv, která mohou ovlivnit jednotlivé vlastnosti dle požadavků procesu. Tzv. modifikátory tření (např. rostlinné tuky) umožňují spojení maziva s kovovým povrchem, aniž by docházelo k chemické reakci. Přísady jsou ovlivněny teplotou procesu, proto je nutné správně volit přísady pro požadované operace. [21]

2.6 Vady výtažků

Při procesu hlubokého tažení plechů se projevují chyby nastavení procesu a samotné výroby. Na vzniklé defekty nemá vliv pouze zvolený plech, ale velkou mírou defekty ovlivňují nastavené parametry procesu a veškeré geometrie nástrojů. Chování plechů je ovlivněno jeho hustotou, pevností v tahu, lomovou houževnatostí, třecími vlastnostmi nebo pevností v tlaku. Samotný výrobní proces ovlivňuje teplota, pracovní tlak nebo lubrikace. Mezi další parametry spadá samotná geometrie tažnice, materiál tažnice a typ zvoleného způsobu tažení. [32]

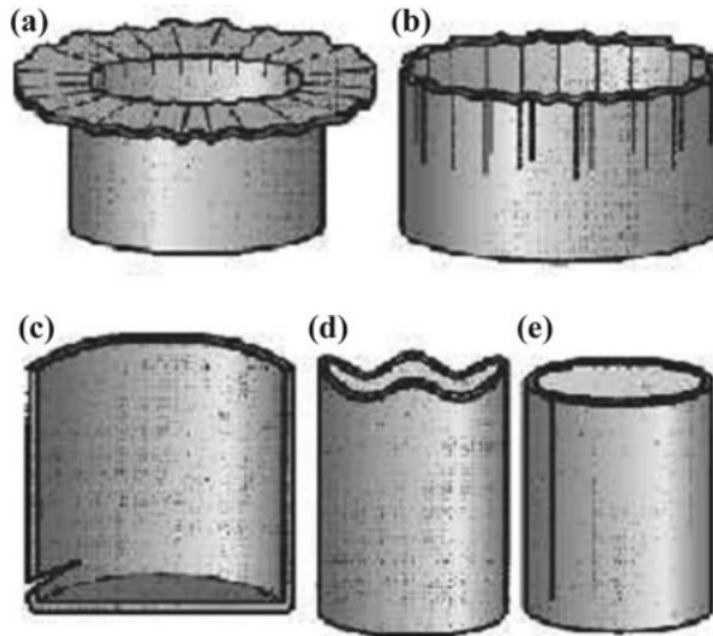
Při tažení vyšších nádob dosahuje tečné napětí kritických hodnot (v přírubě dochází k tvorbě vln, které mohou při zvětšování způsobit podstatný vzrůst tažné síly a vedou k utržení dna výtažku). Pro vytvoření výtažku je nutné tvářet na více operací.



Obr. 29 – vlny na výtažku [19]

Vzniku vln lze zabránit vhodnou volbou tažné mezery. Při tažení se přesunuje objem, který se během tažení vytlačuje, zvětšuje výšku nádoby a mění tloušťku stěny. Při tažení postupuje materiál z příruby do válcové části, proto má plech snahu se v místě příruby vlnit, a to hlavně při vysokém stupni deformace. Při malém stupni deformace a při velké tloušťce materiálu se vlny netvoří, protože nejsou vysoké a vyhlazují se otvorem tažnice. Zabránit vzniku vln lze přidržovačem, ovšem za cenu pěchování materiálu pod přidržovačem a růstu tloušťky. V případě použití přidržovače je nutné znát velikost měrného tlaku přidržovače. Měrný tlak přidržovače závisí na tloušťce plechu, poměru výchozí tloušťka plechu ku průměru nádoby, jakosti plechu a součiniteli tažení m . Celková síla přidržovače je součinem měrného tlaku a činné plochy přidržovače.

Příklady defektů demonstruje nejjednodušší způsob tažení válcového výtažku, kde se při špatně nastavených podmínkách nejvíce projeví základní defekty. Odstranění problémů lze řešit i pomocí brzdících žebër nebo úpravou tažnice a přidržovače.



Obr. 30 – Základní defekty hlubokého tažení plechů;
a) vlnění v přírubě; b) vlnění na stěně; c) roztržení;
d) earring; e) poškrábání povrchu [33]

3 MATERIÁLY PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ

Plechý pro technologii hlubokého tažení jsou velmi důležitou skupinou materiálů primárně v automobilovém průmyslu. Pomocí tažení lze připravovat panely karoserie, blatníky, střechy aut, panely dveří aj. S ohledem na aplikaci poskytují oceli odlišné mechanické vlastnosti. Mohou vynikat vysokou mezí kluzu, pevností v tahu nebo vysokou lomovou houževnatostí. Díky velké lokální deformaci při hlubokém tažení vyniká díl svými mechanickými vlastnostmi, čehož je využito během autonehod, kdy dojde k absorbování deformační energie, a tím i k ochraně posádky automobilu. [34]

3.1 Vlastnosti plechů vhodné k tažení

Tvářitelnost plechů je ovlivněna především chemickým složením, texturou materiálu a mikrostrukturou. Nízkouhlíkové oceli obsahují řadu doprovodných prvků (Si, P, Cr aj.). Hlubokotažné oceli se vyskytují v provedení jako neuklidněné oceli, nebo uklidněné se stabilizujícími prvky (Al, Ti, Zr aj.). Vliv mikrostruktury je značný na hluboko tažnost. U nízkouhlíkových ocelí se vyskytují především fáze feritu a cementitu, rozhodující vliv na vlastnosti má velikost a tvar feritických zrn (zploštělý tvar u ocelí stabilizovaných hliníkem), dále je požadován globulární grafit. Pro zaručení rovnoměrnosti při tažení plechů se předpokládá rovnoměrná velikost feritických zrn. [16]

Dosažené mechanické vlastnosti plechů jsou nejvíce ovlivněny obsahem uhlíku, který by neměl překročit hodnotu 0,1 %. Další prvky obsažené v oceli svým procentuálním zastoupením značně ovlivňují vlastnosti oceli.

Mangan

Zvyšuje hodnotu pevnosti a tvrdosti, ale zároveň snižuje houževnatost oceli. Mangan je v oceli nezbytný kvůli schopnosti vázat síru na potřebné sulfidy manganu (obsah maximálně 0,40 %).

Křemík

Prvek obsažen pouze ve stabilizovaných ocelích, protože v neuklidněných ocelích způsobuje zpevnění, a tím snižuje plasticitu (obsah do 0,03 %).

Fosfor a síra

Prvky jsou nepřijatelné v hlubokotažných ocelích a proto je snaha zajistit co nejnižší úroveň prvků (max. 0,035 %).

Dusík a kyslík

Dochází k vytváření nekovových vměstků (oxidy a nitridy), které způsobují stárnutí ocelí a značně snižují plasticitu při hlubokém tažení. Hodnota prvků N_2 a O_2 se udává maximálně 0,006 %.

Doprovodné prvky

Poslední skupinu obsaženou v ocelích tvoří doprovodné prvky (Cu, Cr, Ni), které se do ocelí dostávají z ocelového odpadu. Doprovodné prvky způsobují nežádoucí zpevňování materiálu. U hlubokotažných plechů se doporučuje obsah Cu maximálně 0,15 %, dále 0,03 % Cr a 0,1 % Ni. [16]

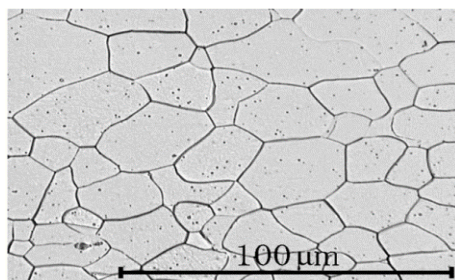
3.2 Hlubokotažné oceli

Pro technologii hlubokého tažení se značně využívají ocelové plechy s odlišnými vlastnostmi. Pro danou technologii je významným parametrem tažnost a tváritelnost materiálů. Vývoj technologie umožňuje využití materiálů s lepšími mechanickými vlastnostmi, případně kombinaci více materiálů a zároveň se neustále snižuje tloušťka plechových dílů a tím i finální hmotnost. [35]

3.2.1 Nízko pevnostní oceli IF (Interstitial Free)

IF oceli neobsahují intersticiální zpevňující atomy, proto vynikají velmi vysokou hodnotou tažnosti. Oceli se vyznačují feritickou maticí s legujícími prvky titanu a niobu. Legující prvky snižují množství uhlíku a dusíku pod hodnotu 0,005 %. Výhodou je odolnost ocelí proti stárnutí. IF oceli se označují jako EED (extra deep drawing steel – oceli vyznačující se vysokou tažností). [36]

IF oceli vynikají nízkou hodnotou meze kluzu, dobrou tváritelností a vysokou rychlostí deformace. IF oceli tvoří základ pro vývoj vysoko pevnostních ocelí, můžou být legovány pomocí dalších prvků (Mn, P, Si aj.). [37]



Obr. 31 – Struktura IF oceli [37]

Oceli lze rozdělit podle legujících prvků na IF – Ti, IF – TiNb a IF – TiNbP. Legující prvky ovlivňují mechanické vlastnosti ocelí jako je mez kluzu, pevnost v tahu nebo tažnost. [38]

Tab. 1 – Porovnání mechanických vlastností IF ocelí [38]

IF ocel	Mez kluzu [Mpa]	Pevnost v tahu [Mpa]	Tažnost [%]
IF - Ti	105,19	260,21	41
IF - TiNb	120,84	278,4	42
IF - TiNbP	162,09	322,54	34

3.2.2 Vysoko pevnostní oceli IF-HS (High Strength steels)

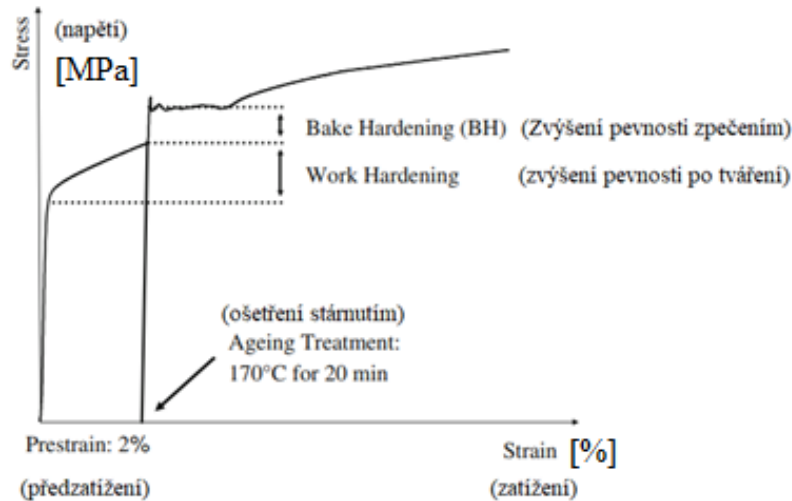
Oceli IF-HS (interstitial free – high strength) lze považovat za oceli IF legované pomocí Mn, Si a P. Oceli se vyznačují feritickou strukturou. Vysoká hodnota deformačního zpevnění zajišťuje dobrou hluboko tažnost a vysokou pevnost pro vyráběné díly. Největší vliv z legujících prvků má fosfor, který značně zvyšuje pevnost oceli (1 % až o 100 MPa). Pevnost moderních IF-HS ocelí se pohybuje mezi 340 – 440 MPa. [35]

Oceli jsou stejně jako IF oceli zpracovávány pomocí válcování za tepla nebo za studena a následně dochází k žíhání. Vlastnosti ocelí jsou značně ovlivněny předchozím způsobem zpracování. Důležitým parametrem pro hluboké tažení je Lankfordův parametr r , udávající poměr přetvoření ve směru šířky k přetvoření ve směru tloušťky (zisk z tahového testu). S vyšší hodnotou r se zlepšuje hluboko tažnost ocelí. [39]

3.2.3 Vysoko pevnostní BH oceli

BH oceli (bake hardenable), jsou nízkouhlíkové feritické oceli, u kterých lze tepelným zpracováním ovlivnit mechanické vlastnosti. Zpevnění je zajištěno kontrolovaným žíháním oceli (při vypalování barvy lakovaných dílů), které způsobuje umělé stárnutí a vytváří se intersticiální atomy uhlíku a dusíku, které stabilizují dislokace (poruchy krystalové mřížky) vzniklé po tváření oceli. Řízené stárnutí probíhá okolo teploty 170 °C. Mez kluzu oceli se zvyšuje precipitací (vyučování fází) karbidů na hranice zrn. BH oceli se využívají pro pohledové panely karoserií, nárazníky, kapoty automobilů, výztuhy a podvozkové díly. Výhodou BH ocelí je kombinace tažnosti, odolnosti proti promáčknutí a snížení tloušťky plechů. Chemické složení zamezuje stárnutí při pokojové teplotě. [40]

Bakeův mechanismus vytvrzení vysvětluje přemístování atomů uhlíku v roztoku během tepelného zpracování. Standartní doba vytvrzení BH ocelí je 20 minut při 170 °C. Po vytvrzení dochází k zamezení pohybu dislokací vzniklých během tváření. Tento mechanismus zvyšuje požadovanou mez kluzu hotového dílu, aniž by předem ovlivnila

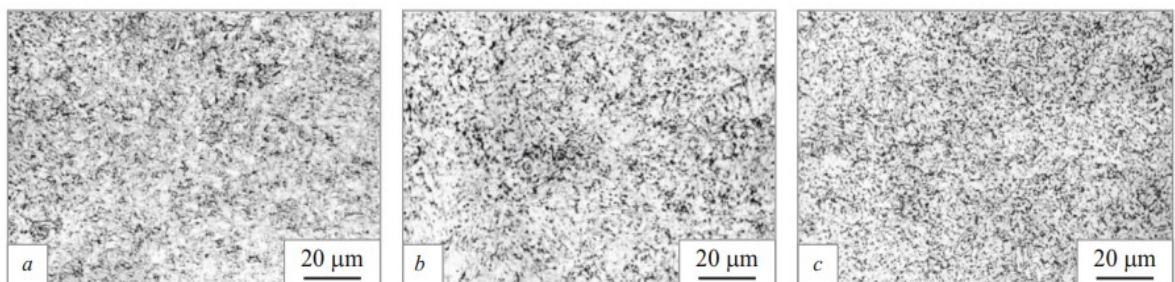


Obr. 32 – Princip zvýšení meze kluzu pomocí tepelného zpracování [41]

proces tváření. Ke zvýšení meze kluzu dochází pomocí tváření a následně pomocí vytvrzení v peci. BH oceli jsou schopny dosáhnout maximální pevnosti v tahu až 600 MPa. [40]

3.2.4 HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

Vysoko pevnostní nízkolegované oceli HSLA obsahují pod 0,2 % uhlíku a vyznačují se vysokou plasticitou. Výroba se provádí válcováním za tepla i za studena. Legujícími prvky jsou vanad, titan, niob, molybden. Legující prvky zjemňují zrna, což ovlivňuje tranzitní teplotu přechodu křehkého a tvárného lomu, zvyšuje pevnost a zlepšuje svařitelnost. Oceli jsou označovány jako mikro legované (nízká koncentrace legujících prvků ve srovnání s dalšími oceli) a využívají se u dynamicky namáhaných dílů, výztužných dílů v automobilovém průmyslu a u složitých výlisků. Výhodou je ušetření hmotnosti až o 30 % ve srovnání s běžnými uhlíkovými oceli se stejnou pevností. [42]

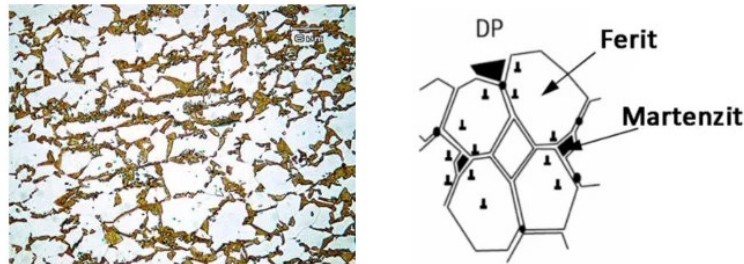


Obr. 33 – Mikrostruktura HSLA oceli po temperování po dobu 24h při teplotě: a) 450 °C; b) 550 °C; c) 650 °C [43]

Dále lze najít uplatnění u mostních konstrukcí nebo u letadlových dílů. U letadel je využití omezeno z důvodu nízké odolnosti proti korozi. Mez kluzu HSLA ocelí se pohybuje mezi 250 – 600 MPa. [42]

3.2.5 DP (dual phase) oceli

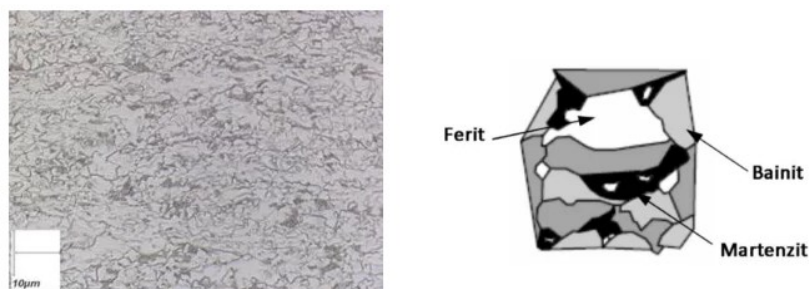
DP oceli jsou nízkolegované oceli podobné HSLA ocelím kombinující výhodou pevnosti a tažnosti. Mikrostruktura se skládá z měkké fáze feritu (70 – 90 %), která poskytuje plasticitu, s tvrdými ostrůvky martenzitu (10 – 30 %), které jsou rozptýlené po celém povrchu. Pevnost se pohybuje od 500 MPa až po 1200 MPa. Pevnost souvisí s množstvím martenzitu obsaženého v mikrostruktuře. Vzhledem ke schopnosti absorpce energie, vysokým hodnotám únavové pevnosti a odolnosti proti vzniku a šíření trhliny se využívají DP oceli u automobilových dílů vyžadujících vysokou pevnost, odolnost proti nárazu a dobrou tvarovatelnost. DP oceli mají schopnost zpevnění po zpracování, což ovlivňuje mez kluzu. Princip se shoduje s BH oceli, kdy se vlivem teploty při vytvrzování laku zvýší mez kluzu. Oceli se vyrábějí válcováním za tepla nebo za studena. [44]



Obr. 34 – Mikrostruktura DP ocelí [45]

3.2.6 CP (Complex Phase) oceli

Nízkouhlíkové CP oceli obsahují větší množství fází než v případě DP ocelí. V mikrostruktuře se vyskytuje malé procento martenzitu a austenitu ve feriticko-bainitické matrici. Dle typu oceli lze pozorovat v mikrostruktuře i perlit. Struktura CP ocelí se vyznačuje jemnozrností, které lze dosáhnout pomalou rekrystalizací nebo precipitací mikro legujících prvků. Legujícími prvky jsou převážně titan a niob. [46]



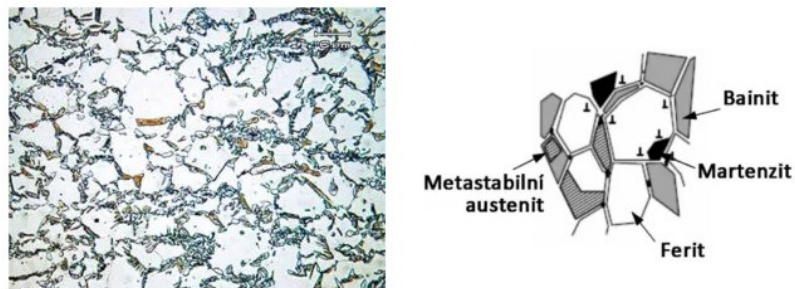
Obr. 35 – Mikrostruktura CP oceli (HDT780C) [45]

CP oceli vynikají vysokou pevností v tahu srovnatelnou s DP oceli (pohybující se nad 800 MPa), ale s podstatně vyšší mezí kluzu. Výhodou oceli je vysoká schopnost absorpce energie. [46]

3.2.7 TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli

Vícefázové oceli TRIP se vyznačují transformačně indukovanou plasticitou, kde dochází k přeměně (transformaci) austenitu na martenzit během plastické deformace. Rozlišuje se nízkolegovaná L-TRIP ocel a vysoce legovaná H-TRIP ocel. Dle složení ocelí se liší mechanické vlastnosti. Volba oceli ovlivňuje použití maziva a nástrojů. [47]

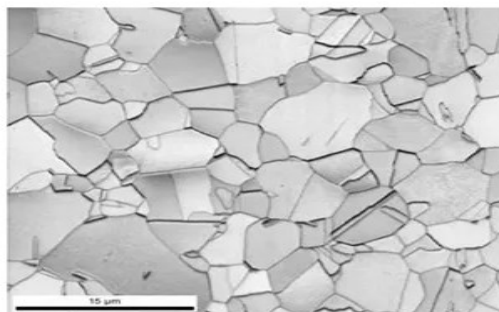
TRIP oceli se řadí k nejnovějším typům vysoko pevnostních ocelí a dosahují pevnosti v tahu až 800 MPa. Mikrostruktura ocelí obsahuje feritickou matici s oblastmi bainitu a austenitu. Ve struktuře se dle způsobu zpracování vyskytuje i martenzit. TRIP oceli se vyznačují vysokou tažností, tvarovatelností a únavovou pevností. V automobilovém průmyslu se využívají pro díly, které vyžadují vysokou absorpci nárazové energie. [48]



Obr. 36 – Mikrostruktura TRIP oceli [45]

3.2.8 TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

TWIP oceli jsou vysoko pevnostní oceli s indukovanou plasticitou, které poskytují vysokou pevnost v tahu a zároveň velmi vysokou tažnost. Struktura TWIP ocelí je austenitická s vysokým obsahem manganu. Dalšími legujícími prvky jsou hliník a křemík, které dále ovlivňují hodnotu tažnosti. Mez pevnosti v tahu se pohybuje přes 1000 MPa a tažnost převyšuje 50 %. [46]



Obr. 37 – Mikrostruktura TWIP oceli [45]

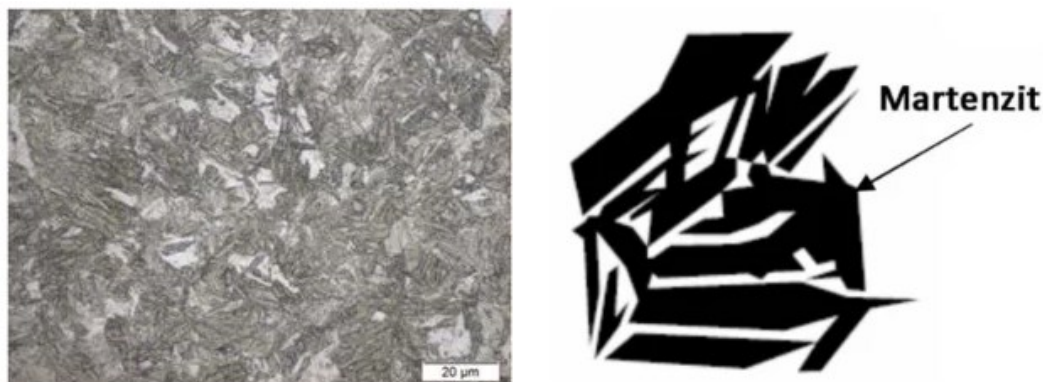
Důvodem vysoké tažnosti je způsob plastické deformace dvojčatením (vysoká rychlost deformace), což vede ke zjemnění struktury a dosažení lepších mechanických vlastností. [46]

3.2.9 MS (Martensitic steel) oceli

Při válcování a následném kalení se austenit přemění na martenzit, proto mají martenzitické oceli ve struktuře primárně martenzit, dále se ve struktuře nachází malé procento feritu a bainitu. Po tváření se provádí tepelné zpracování dílů, čímž lze také docílit požadovanou martenzitickou strukturu. Množství uhlíku C se pohybuje maximálně kolem 0,15 % a značně ovlivňuje kalitelnost, další možností je přidání legujících prvků (Cr, Mo, Ni, V aj.). [46]

MS oceli lze použít pro automobilové karoserie, kde je pevnost v tahu až 1500 MPa, dále lze využít oceli v konstrukčních aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost a snížení hmotnosti. Obecně se oceli využívají pro aplikace, kde je vyžadována vysoká tvrdost (např. těžební průmysl). [49]

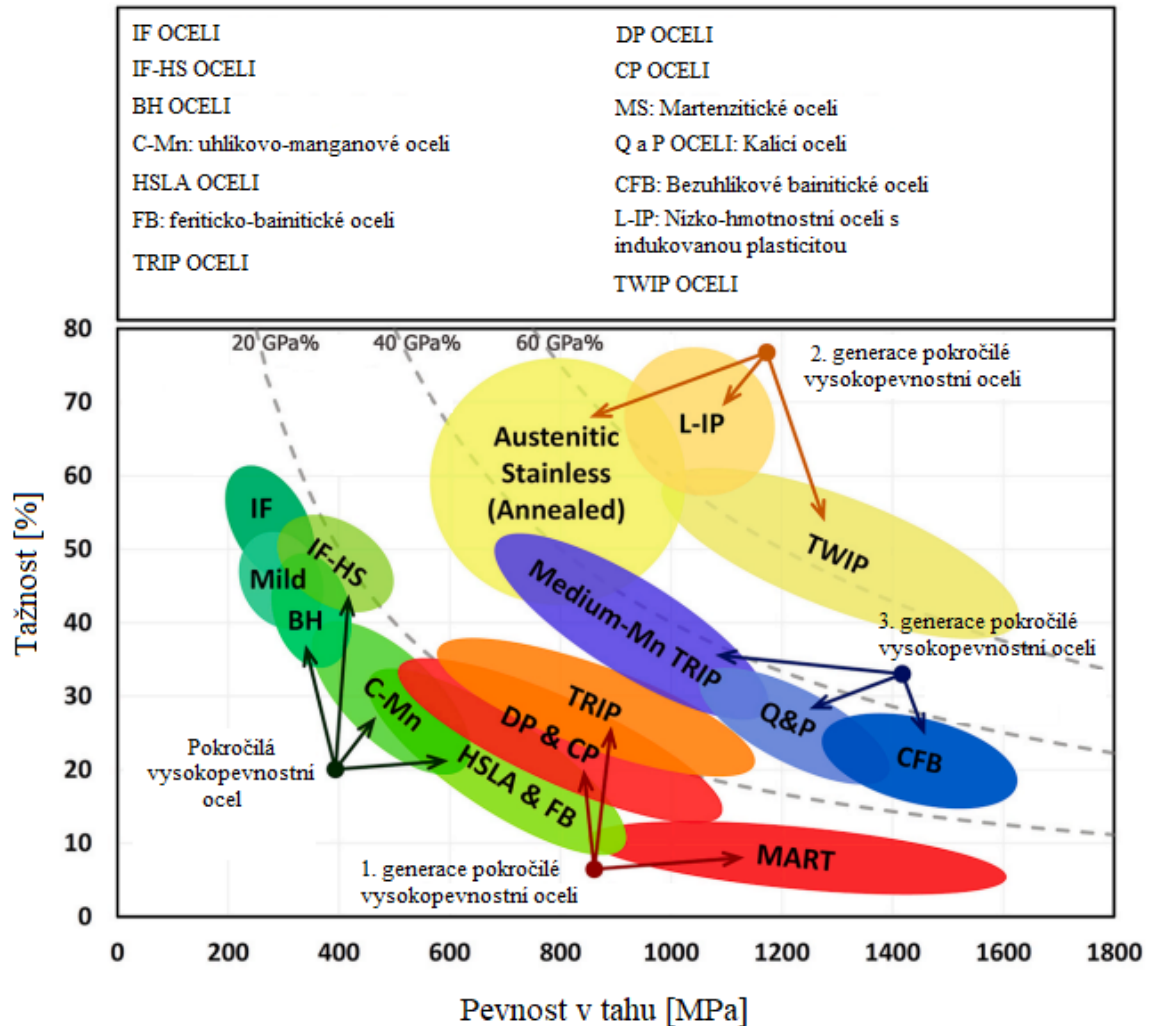
Vzhledem k nízkému obsahu chromu a ostatních legujících prvků jsou oceli levnější, avšak mají sníženou odolnost proti korozi. [50]



Obr. 38 – Mikrostruktura martenzitu [45]

3.2.10 Běžně využívané oceli

Obr. 39 poukazuje na srovnání jednotlivých typů ocelí používaných pro technologii hlubokého tažení. Graf vyjadřuje závislost meze pevnosti v tahu na tažnosti oceli. Jednotlivé oceli se značně liší tažností a dle požadované aplikace se volí vhodná ocel.



Obr. 39 – Graf závislosti pevnosti v tahu a tažnosti pro běžně používané oceli [51]

4 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY PLECHŮ

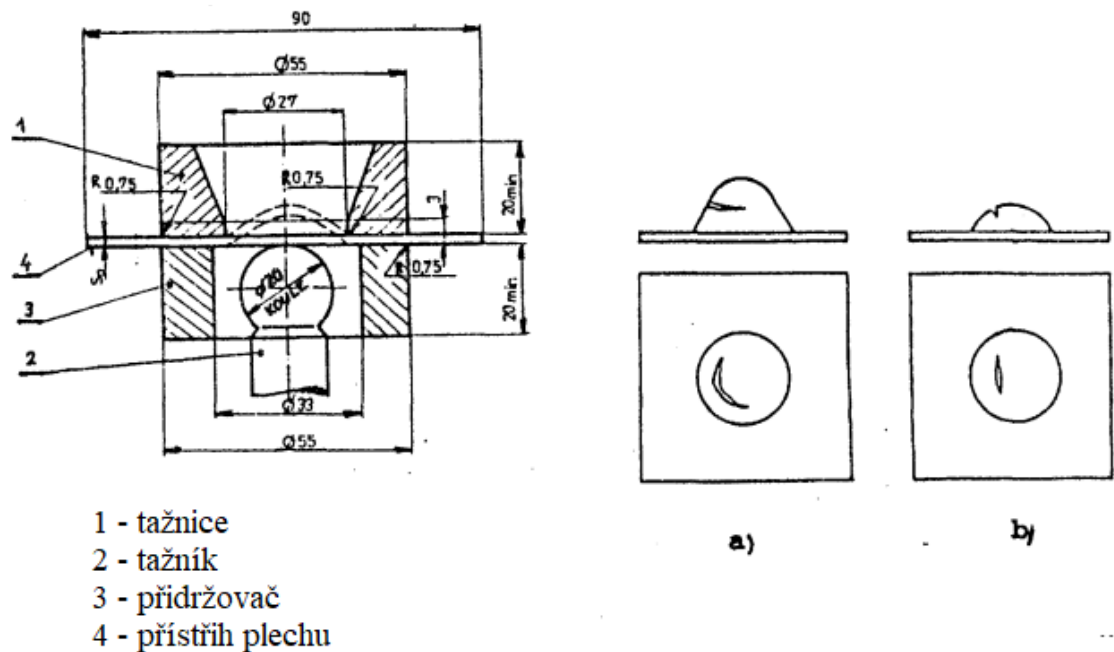
Pro posouzení hluboko tažnosti plechů se provádějí technologické zkoušky, které přibližují chování plechu k reálnému procesu tváření. Mezi základní technologické zkoušky hluboko tažnosti patří následující zkoušky:

- Zkouška hloubením podle Erichsena.
- Zkouška kalíškovací.
- Zkouška podle Engelhardta – Grosse.
- Zkouška dle Siebela a Pompa.
- Fukiiho zkouška.
- Hydraulická zkouška.
- Zkouška dvojosým tahem. [16]

4.1 Zkouška dle Erichsena

Jednou z prvních technologií k posuzování hluboko tažnosti tenkých plechů byla zkouška hloubením podle Erichsena. Zkouška spočívá ve vtlačování tažníku ve tvaru koule o průměru 20 mm do středu tvaru plechu, čímž vzniká prohloubení plechu. Síla se přenáší hydraulicky nebo mechanicky. Plech je přidržován pomocí přidržovače a tvarování plechu je spjato s tvarem tvárnice. Test definuje norma ISO 20482 a umožňuje ověřit tvářitelnost různých typů plechů. Výsledkem je Erichsenovo číslo EI, které udává hloubku protažení plechu do vzniku první trhliny. [52]

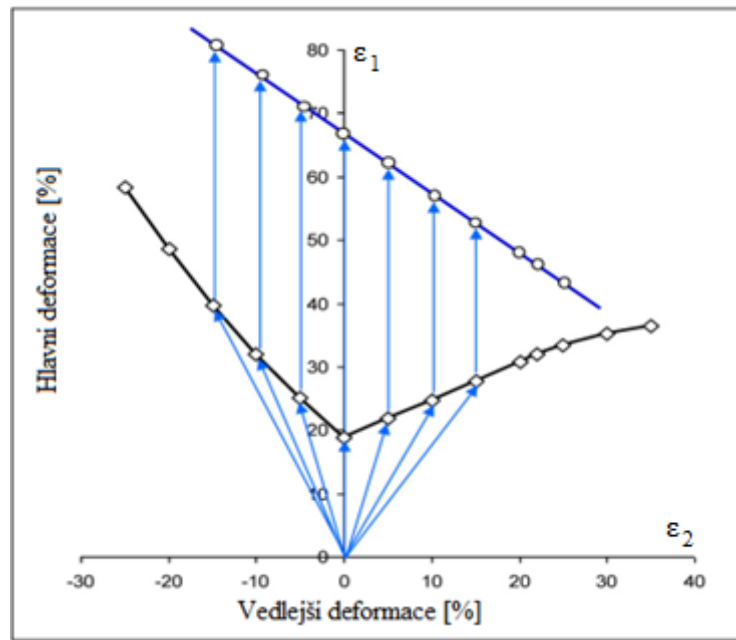
Výhodou zkoušky je jednoduchost, snadná příprava vzorků a časová nenáročnost. Vyhodnocení vhodnosti plechu pro hluboké tažení uvažuje tvar vzniku trhliny (viz. Obr. 40). Nevýhodou zkoušky při ručním pohybu tažníku je zkreslení výsledků, které jsou závislé na rychlosti a plynulosti vtlačování tažníku. Zkouška nezachycuje anizotropii mechanických vlastností plechu a může zkreslovat výsledky pro jeden typ plechu v rámci jedné provedené zkoušky. [16]



Obr. 40 – Schéma zkoušky hluboko tažnosti; a) hlubokotažný plech, b) nevhodný plech pro hluboké tažení [16]

4.2 Test LDH/Nakajima a Marciniak

Hodnoty deformací zobrazuje FLD diagram, který obsahuje naměřené hodnoty deformací materiálu. Pro posouzení mezní tvářitelnosti plechových dílů slouží křivka mezní tvářitelnosti FLC (forming limit curve), která označuje přechod z bezpečných hodnot do hodnot porušení plechu. FLC křivka představuje téměř reálnou deformaci materiálu (předpoklad lineární trajektorie deformace). Zjištění maximálního stupně linearity deformace se provádí nanesením deterministické mřížky o přesných rozměrech na nedeformovaný přístřih plechu. Plech se následně deformuje za použití postupu dle Nakajimy (LDH) nebo Marciniaka. V deformovaném výtažku se stanoví hodnoty příčných deformací (oblasti s lokálním porušením se vyloučí). Maximální deformace (bez porušení výtažku) se určí interpolací. Nalezené maximum interpolované křivky se označuje jako mezní tvářitelnost. Meze tvářitelnosti se stanoví pro více deformačních trajektorií, u kterých se liší poměry hlavní a vedlejší deformace. Deformační trajektorie přechází od jednoosému k dvuosému tahu. Pro různé stavy deformace se vynesou hodnoty, ze kterých vznikne křivka mezní tvářitelnosti. Křivka popisuje funkci skutečné deformace hlavní a vedlejší deformace na povrchu plechu. Vedlejší deformace ε_2 reprezentuje osa X a hlavní deformace ε_1 osa Y. [53]



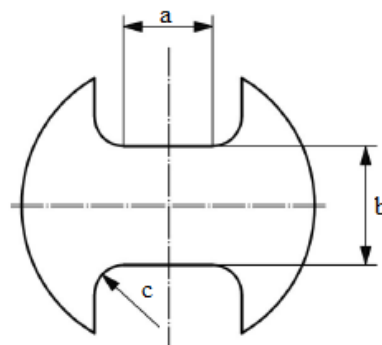
Obr. 41 – Křivka mezní tváritelnosti FLC [54]

Zkouška LDH se využívá pro rovinné kovové plechy s tloušťkou 0,3 mm – 4 mm. Pro zkoušku dle normy ČSN EN 12004-2 se využívá zkušební těleso dle Obr. 42. Pro tažník průměru 100 mm bude délka dřívku 25 – 50 mm a poloměr zaoblění 20 – 30 mm. Pro přípravu těles lze využít frézování nebo elektrojiskrové obrábění. [53]

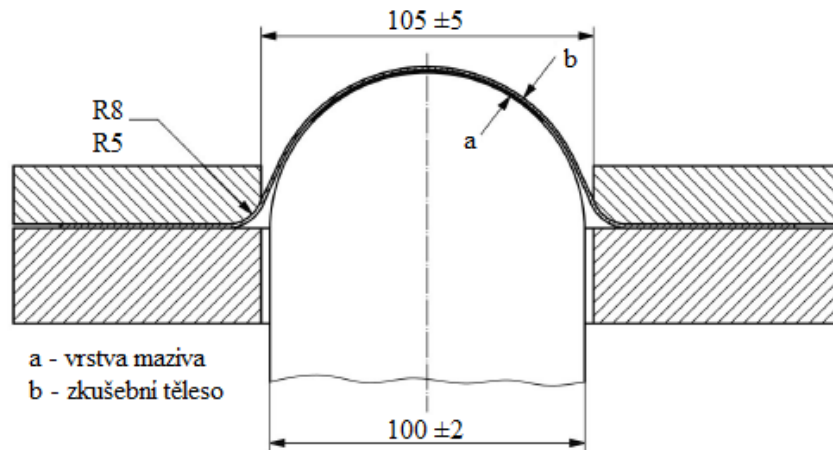
Pro nanášení mřížky se uvažuje tloušťka materiálu, u níž je povolený rozměr mřížky roven maximálně 2,5 násobku tloušťky materiálu. Obecně se využívá rozměr mřížky 1 – 2 mm. Mřížka nesmí ovlivnit vrubem chování materiálu. Po provedení tažení se provádí měření rozteče mřížky, u kterého nesmí být směrodatná odchylka větší než 2 %. [53]

Zkouška podle Nakajimy využívá polokulový razník a u této metody dochází k počáteční nelineární deformační trajektorii. Nelinearita je akceptovatelná, proto lze vyhodnotit FLC křivky. [53]

- a - délka dřívku
- b - zbývající šířka výstřižku
- c - poloměr zaoblění



Obr. 42 – Zkušební těleso pro zjištění FLC křivek [53]



Obr. 43 – Základní schéma zkoušky LDH (Nakajima) [53]

Zkouška je platná, pokud dochází k lomu ve vzdálenosti nedosahující 15 % průměru tažníku od vrcholku výtažku. Vzorek nesplňující podmínky je vyřazen. U zkoušky se využívá mazivo, které nesmí být měněno během stanovování jedné křivky FLC. Mazivo umožňuje splnění podmínek zkoušky pro většinu materiálů. Jako mazivo se využívá olej, PE a PTFE fólie, měkké pásy z PVC. [53]

4.3 Zkouška rozšiřováním otvoru dle Siebela a Pompa

Základ zkoušky tvoří rozšiřování otvoru o průměru d na čtvercovém přístřihu plechu. Během zkoušky se vtláče válcový tažník s plochým čelem do středu plechu se zhotoveným otvorem. Průměr otvoru v plechu a průměr tažníku jsou v poměru 1 ku 3. Tažením dochází ke zvětšování průměru otvoru a zkouška je ukončena při objevení první radiální trhliny kolem otvoru v plechu. [55]

U zkoušky se vyhodnocuje hloubka tažení t , rozšíření otvoru d' a nerovnoměrnost deformace vlivem anizotropie mechanických vlastností. Pro celkové vyhodnocení zkoušky slouží vztah:

$$q = \frac{t \cdot (d'_{\max} + d'_{\min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{\max} - d'_{\min})} \quad [mm] \quad (15)$$

- q – jednotné číslo [mm]
- t – hodnota hloubky tažení [mm]
- d'_{\max} – horní mez průměru otvoru po tažení [mm]
- d'_{\min} – dolní mez průměru otvoru po tažení [mm]

- d_0 – počáteční průměr otvoru [mm] [16]

Rozšíření otvoru d' lze popsat vztahem:

$$d' = \frac{d'_{max} + d'_{min}}{2} \text{ [mm]} \quad (16)$$

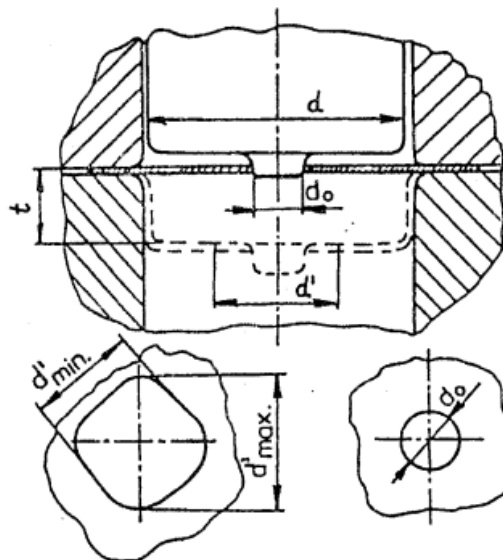
- d' – průměr otvoru po tažení [mm]
- d'_{max} – horní mez průměru otvoru po tažení [mm]
- d'_{min} – dolní mez průměru otvoru po tažení [mm]

Nerovnoměrnost deformace n lze následně definovat jako:

$$n = \frac{d'_{max} + d'_{min}}{d'} \text{ [-]} \quad (17)$$

- n – nerovnoměrnost deformace [-]
- d' – průměr otvoru po tažení [mm]
- d'_{max} - horní mez průměru otvoru po tažení [mm]
- d'_{min} - dolní mez průměru otvoru po tažení [mm]

Dle zkoušky lze konstatovat závěr, že se zvyšující se hloubkou tažení t , zvětšujícím se průměrem d' a zachováním nejnižší hodnoty anizotropie dochází ke kvalitnějšímu tažení. [16]



Obr. 44 – Zkouška dle Siebela a Pompa [16]

5 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Vhodnost plechu pro hluboké tažení je dána primárně jeho mechanickými vlastnostmi, proto je nutné provádět zkoušky jejich mechanických vlastností. Mezi základní mechanické zkoušky plechů patří tahová zkouška a zjišťování tvrdosti, případně mikro-tvrdosti. Mechanické vlastnosti ovlivňuje celá řada faktorů jako je typ materiálu, způsob zpracování, chemické složení aj. Pomocí mechanických zkoušek lze definovat důležité mechanické vlastnosti jednotlivých typů plechů, které jsou následně k dispozici pro široké spektrum trhu.

5.1 Zkoušky tvrdosti

Z hlediska principu se uvažují zkoušky vnikací nebo odrazové, z hlediska zatěžující síly se zkoušky dělí na statické a dynamické. Zatěžující síla slouží i pro dělení na mikro a makro tvrdost. Různé hodnoty tvrdosti materiálů jsou ovlivněny elastickými i plastickými vlastnostmi, chemickým složením, čistotou kovů, velikostí zrn (případným tepelným zpracováním) a způsobem výroby plechu. Tvrdost lze měřit jak u samotného materiálu, tak případných povlaků, kterými jsou plechy opatřeny.

Měření tvrdosti plechů se provádí pro zjištění tvrdosti materiálů, primárně je využívána statická metoda měření tvrdosti podle Vickerse nebo podle Rockwella. Statická metoda označuje vtlačování indentoru do zkoušeného materiálu. Rockwellova i Vickersova metoda se používá primárně pro tenké plechy. U plechů s větší tloušťkou lze využít metodu podle Brinella, je však nutné dodržet podmínku tloušťky plechu a hloubky vtisku. Tloušťka plechu by měla být alespoň 8x větší než hloubka vtisku (u Brinellovy metody). [16]

Zkoušky tvrdosti jsou normalizovány a kombinují se s technologickými zkouškami pro komplexnější posouzení mechanických vlastností a vhodnosti plechů pro tváření. Vyhodnocením je u statických metod hloubka vtisku nebo plocha vtisku po indentoru. Dynamické zkoušky se pro měření nevyužívají, takže nebudou dále řešeny.

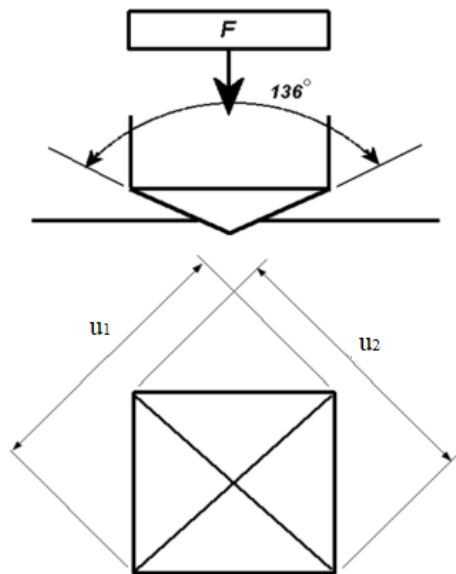
5.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Metoda podle Vickerse se řadí mezi statické zkoušky tvrdosti. Indentorem Vickersovy zkoušky tvrdosti je čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136°, doba vtisku se běžně pohybuje mezi 10 – 15 s a velikost zatěžující síly je v rozmezí 50 N (HV 5) až 1000 N (HV 100). Po provedení zkoušky se měří uhlopříčky vtisku, jejichž hodnoty jsou zprůměrovány a pro výpočet se dosazuje průměrná hodnota délky uhlopříčky. Tvrdost lze

určit pomocí tabulek (zatěžující síla a délka uhlopříčky) nebo lze vypočítat pomocí vztahu: [56]

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} [MPa] \quad (18)$$

- HV – hodnota tvrdosti dle Vickerse [MPa]
- F – zatěžující síla [N]
- u – průměrná délka uhlopříčky vtisku [mm] [57]



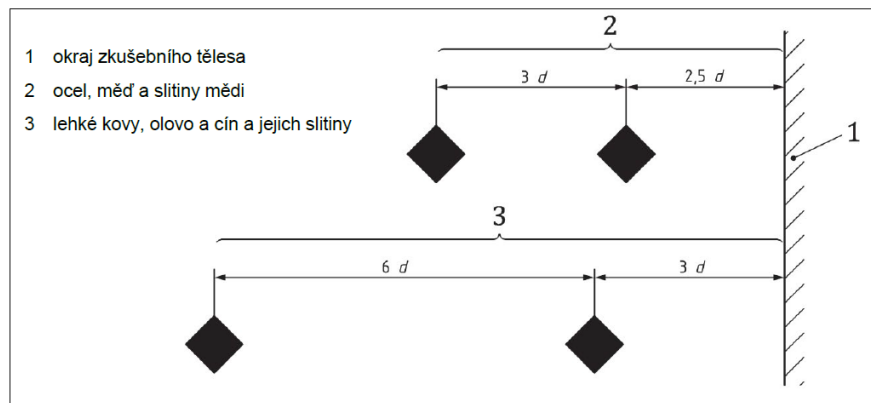
Obr. 45 – Schéma zkoušky dle Vickerse [58]

Metoda měření tvrdosti dle Vickerse je univerzální metodou měření tvrdosti pro široké množství materiálů, vtisk ve zkoušeném předmětu je poměrně malý, takže lze měření provést i na hotovém dílu. Nevýhodou je nutnost přípravy kvalitního povrchu před provedením zkoušky.

Zápis hodnoty tvrdosti dle Vickerse lze psát ve tvaru např. 550 HV 10/20 kde 550 je hodnota tvrdosti, HV označuje metodu dle Vickerse, číslo 10 je hodnota zatížení 10 kg (98,07 N) a 20 označuje dobu zatížení v sekundách. [59]

Zkouška měření tvrdosti podle Vickerse se řídí podle normy ČSN EN ISO 6507-1. Vyhodnocení vtisku se provádí na mikroskopech, které splňují normu ISO 6507-2. Norma ISO 6507-1 dále definuje parametry tloušťky materiálu, který musí mít aspoň 1,5 násobek délky uhlopříčky vtisku. Norma uvádí i čas, během kterého by mělo být dosaženo

maximálního zatížení (3 – 8 s) nebo polohu vzdálenosti vtisků mezi sebou a jejich polohu od kraje dílu. [60]



Obr. 46 – Polohy vtisků pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [60]

5.1.2 Zkouška mikro-tvrdomosti dle Vickerse

Mikro-tvrdomost se od makro-tvrdomosti odlišuje především ve velikosti aplikovaného zatížení, které se pohybuje od 1 g do 1 kg. Běžně se pro zjišťování mikro-tvrdomosti využívají metody dle Vickerse (vtlačování diamantového kuželu). Mikro-tvrdomost se využívá pro měření tvrdosti velmi tenkých materiálů, povlaků, strukturních složek a fází, křehkých materiálů nebo vrstev vytvořených pomocí chemicko-tepelného zpracování. Další nevýhoda spočívá v ovlivnění závislosti hodnoty tvrdosti na velikosti zatížení.

Tab. 2 – Rozsah zatížení pro zkoušku mikro a makro-tvrdomosti dle Vickerse [61]

Rozsahy zkušebního zatížení, F N	Značka tvrdosti	Význam
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	HV 0,2 až < HV 5	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,009\ 807 \leq F < 1,961$	HV 0,001 až < HV 0,2	Zkouška mikrotvrdomosti podle Vickerse

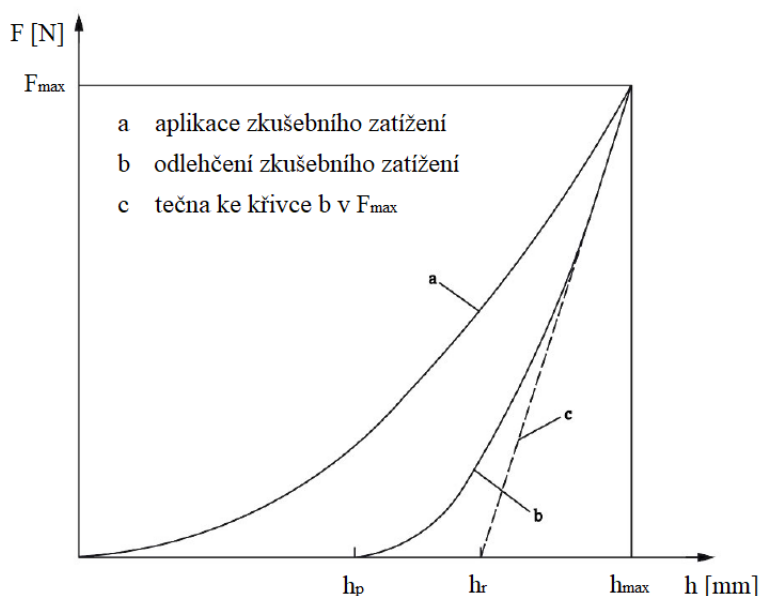
Důležitým parametrem pro vyhodnocování mikro-tvrdomosti je malá rozlišitelnost mikroskopu, aby bylo možné co nejpřesněji odměřit délku uhlopříček. Norma ISO 6507-1 udává v tabulce rozlišitelnost 0,0004 mm. Oproti běžné makro tvrdosti se u mikro-tvrdomosti upravuje rychlost vnikání indentoru, která je musí být nižší než 0,070 mm/s. U mikro-tvrdomosti vzniká omezení v možnosti měření uhlopříček vtisku indentoru pomocí optického mikroskopu (průměrná hodnoty uhlopříček nebude lepší než 0,001 mm). [61]

5.2 Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI

Instrumentovaná zkouška tvrdosti DSI (depth sensing indentation) neboli IIT (instrumented indentation testing) je pokročilou nedestruktivní metodou zjišťování tvrdosti materiálů. Na rozdíl od běžných metod měření tvrdosti je IIT metoda schopna detekovat

a vypočítat kontaktní plochu mezi zkoušeným vzorkem a indentorem bez použití optického měření vtisku. [62]

Měření tvrdosti je prováděno vtlačováním diamantového indentoru do zkoušeného materiálu se zvyšujícím se zatížením. Při zkoušce se sleduje jak hloubka vtlačení, tak zatížení po celou dobu zatěžování i odlehčování indentoru. Metodu IIT lze aplikovat pro měření silných i tenkých povlaků, a zároveň pro měření měkkých i tvrdých materiálů. Výhodou je výpočet instrumentované tvrdosti a modulu pružnosti při jednom měření. Nově vzniklé analytické metody umožňují dále vyhodnocení creepového chování nebo viskoelastických vlastností materiálů. [63]



Obr. 47 – Indentační křivka měření tvrdosti podle DSI metody [64]

Instrumentovaná vnikací zkouška se řídí dle normy ISO 14577 a pro běžné využití se rozděluje podle rozsahu měřicí síly na:

- Makro – $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$,
- Mikro – $2 \text{ N} > F$; $h > 0,2 \text{ } \mu\text{m}$,
- Nano – $h \leq 0,2 \text{ } \mu\text{m}$. [64]

Zkoušení materiálů pomocí metody IIT umožňuje vyhodnocení vtisků do materiálů s ohledem na zatěžující sílu a posun indentoru během elastické i plastické deformace zkoušeného tělesa.

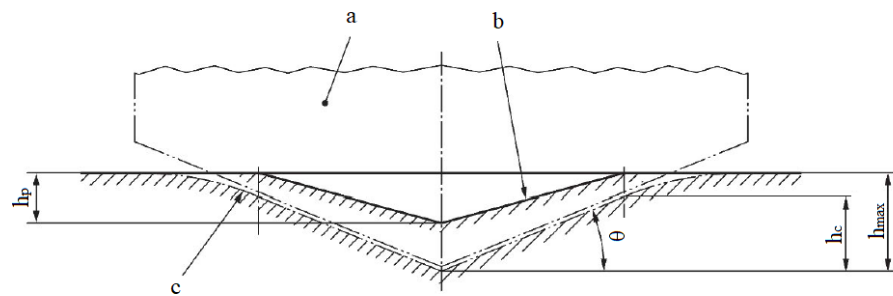
5.2.1 Princip metody DSI

Zaznamenávání zatížení a hloubky vtisku umožňuje stanovit nejen samotnou tvrdost, ale i materiálové charakteristiky. Indentor musí vykazovat vyšší tvrdost než zkoušený materiál. Jako indentory se využívají:

- Diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou.
- Diamantový jehlan s trojúhelníkovou základnou.
- Tvrdokovová kulička (stanovení elastického chování).
- Diamantový kužel se sférickým vrcholem. [64]

Legenda

- a vnikací těleso
- b povrch vtisku vykazující plastickou odezvu
- c povrch zkušební tělesa při maximální hloubce vtisku a maximálním zatížení
- θ maximální úhel mezi povrchem zkušební tělesa a povrchem vnikacího tělesa



Obr. 48 – Schéma zkoušky pomocí metody DSI [64]

Metoda měření je založena na elasticko-plastickém zatěžování zkušební tělesa a elastickém odlehčování. Chování znázorňuje Obr. 48, kde lze pozorovat rozdílnou hloubku vtisku při maximálním zatížení a hloubkou po odlehčení. Po odstranění zatížení dochází k uvolnění elastické deformace, což se projeví snížením hloubky vtisku. Před měřením je nutné očistit a odmastit povrch zkoušeného tělesa kvůli nežádoucímu kontaktu s nečistotami. Proces čištění nesmí narušit povrchové vlastnosti tělesa.

5.2.2 Stanovení vtiskové tvrdosti H_{IT}

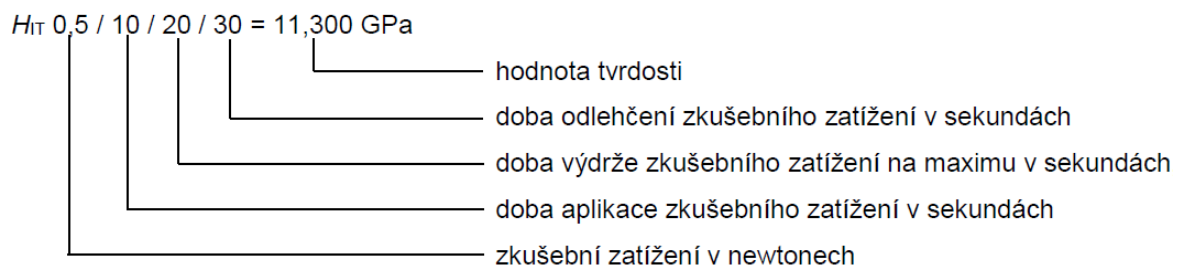
Vtisková tvrdost je definována jako odpor materiálu proti trvalé deformaci. Tiskovou tvrdost lze definovat jako:

$$H_{IT} = \frac{F_{max}}{A_p(h_c)} [MPa] \quad (19)$$

- H_{IT} – vtisková tvrdost [MPa]
- F_{max} – maximální zkušební zatížení [N]
- $A_p(h_c)$ – průmět kontaktní plochy vnikacího tělesa ve vzdálenosti h_c od hrotu [mm²] [65]

Kontaktní hloubka h_c se odvodí z odlehčovací křivky, u které se uvažuje i tečna vymezující hloubku vtisku h_r , maximální hloubka vtisku h_{max} a proměnná ε závisící na tvaru indentačního tělesa. [64]

Označení vtiskové tvrdosti H_{IT} vyjadřuje Obr. 49.



Obr. 49 – Způsob zápisu tiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu DSI [64]

5.2.3 Stanovení vtiskového modulu E_{IT}

Další materiálovou charakteristikou je vtiskový modul pružnosti E_{IT} , redukovaný modul E_r a modul rovinné deformace E^* . Vtiskový modul lze obecně zjistit ze směrnice tečny k odlehčovací křivce. Pro ideální případ lze modul vypočítat dle:

$$E^* = \frac{E_{IT}}{1 - \nu_s^2} \rightarrow E_{IT} = E^* \cdot (1 - \nu_s^2) \text{ [MPa]} \quad (20)$$

- E_{IT} – vtiskový modul zkušebního tělesa [MPa]
- E^* – modul rovinné deformace [MPa]
- ν_s – Poissonův poměr [-] [64]

Redukovaný modul E_r je dále definován pomocí rovnice:

$$E_r = \frac{\sqrt{\pi}}{2 \cdot C_s \cdot \sqrt{A_p(h_c)}} \text{ [MPa]} \quad (21)$$

- E_r – redukovaný modul rovinné deformace kontaktu [MPa]
- C_s – kontaktní poddajnost po korekci poddajnosti stroje [nm/mN]

- $A_{p(hc)}$ – průmět kontaktní plochy vnikacího tělesa ve vzdálenosti hc od hrotu [mm^2] [64]

Pro možnost vypočítat jednotlivé parametry je nutné vyčíslit modul rovinné deformace E^* dle:

$$E^* = \frac{1}{\frac{1}{E_r} - \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}} [\text{MPa}] \quad (22)$$

- E^* – modul rovinné deformace [MPa]
- E_r – redukovaný modul rovinné deformace kontaktu [MPa]
- E_i – modul vnikacího tělesa [MPa]
- ν_i – Poissonův poměr vnikacího tělesa [-] [64]

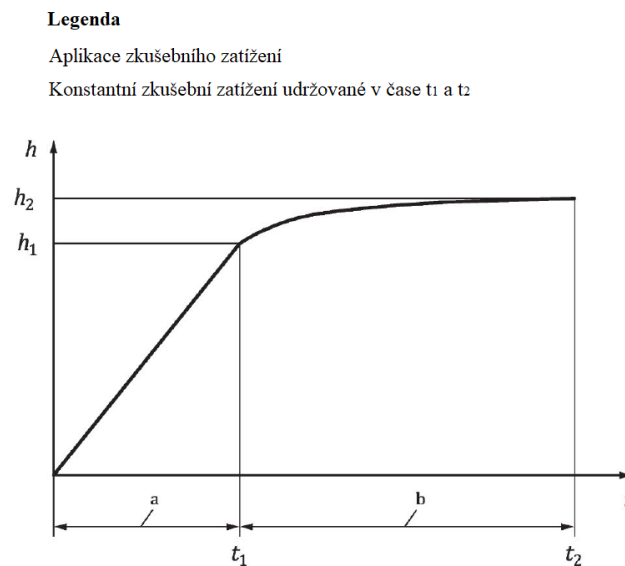
5.2.4 Stanovení vtiskového tečení C_{IT}

Při konstantním zatížení dochází ke změně hloubky vtisku, což je označováno jako Creepové chování materiálu a lze vypočítat relativní změnu hloubky vtisku podle vztahu:

$$C_{IT} = \frac{h_2 - h_1}{h_1} \cdot 100 [\%] \quad (23)$$

- C_{IT} – vtiskové tečení [%]
- h_1 – hloubka vtisku v čase (t_1), kdy je dosaženo zkušebního zatížení, které je udržováno na konstantní úrovni [mm]
- h_2 – hloubka vtisku v čase (t_2) výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení [mm] [64]

Vyjádření vtiskového tečení znázorňuje Obr. 50, na kterém lze vidět změnu hodnoty vtisku v časovém úseku při konstantním zatížení.



Obr. 50 – Znázornění vtiskového tečení [64]

5.2.5 Stanovení práce plastických a elastických složek vnikacího procesu

Mechanická práce W_{total} se spotřebovává z části jako plastická deformační práce W_{plast} a při zpětném odlehčování uvažujeme práci jako elastickou W_{elast} . Zkušební těleso lze charakterizovat jako:

$$\eta_{IT} = \frac{W_{elast}}{W_{total}} \cdot 100 [\%] \quad (24)$$

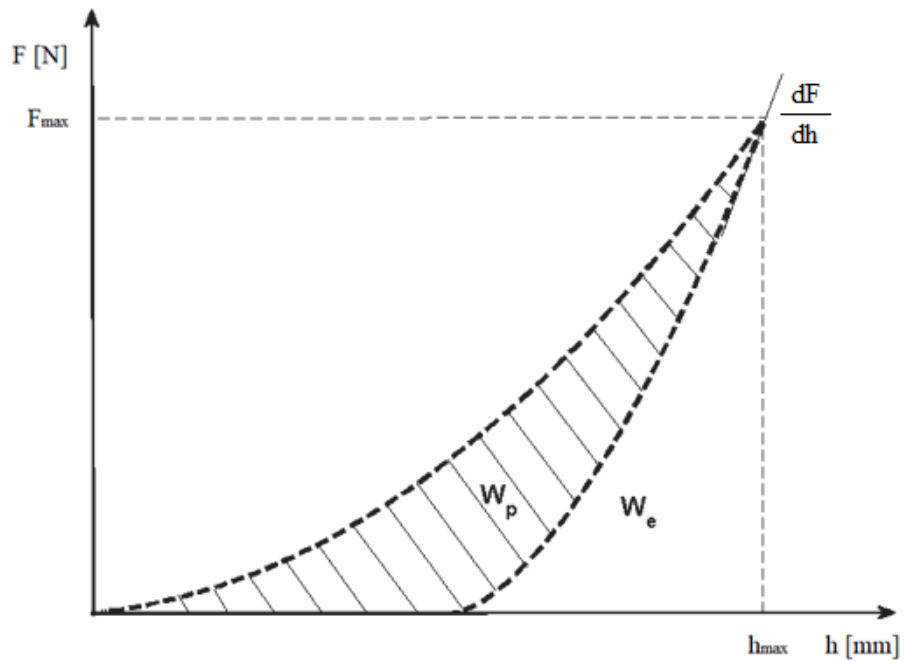
- η_{IT} – poměr elastické a plastické práce [%]
- W_{elast} – elastická zpětná deformační práce vnikacího procesu [Nm]
- W_{total} – celková mechanická práce vnikacího procesu [Nm] [64]

Celková práce se vyjadřuje vztahem:

$$W_{total} = W_{elast} + W_{plast} [Nm] \quad (25)$$

- W_{total} – celková mechanická práce vnikacího procesu [Nm]
- W_{elast} – elastická zpětná deformační práce vnikacího procesu [Nm]

- W_{plast} – plastická deformační práce vnikacího procesu [Nm] [66]



Obr. 51 – Plastická a elastická část vnikacího procesu [66]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Pro diplomovou práci byly stanoveny následující cíle:

1. Vypracovat literární studii na dané téma.
2. Výběr plechů pro hluboké tažení.
3. Provedení výroby dílů s různými podmínkami hlubokého tažení plechů.
4. Provedení měření mechanických vlastností.
5. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Hlavní část diplomové práce tvoří praktická část, která se zabývá především výzkumem vlivu hlubokého tažení plechů na mechanické vlastnosti. Hodnocení mechanických vlastností nelze provést bez předchozích postupů, které jsou popsány v následujících kapitolách diplomové práce.

V prvním kroku bylo nutné vybrat materiály plechů, které lze využít pro hluboké tažení, aby bylo možné získat požadované výsledky mechanických vlastností. Spolu s výběrem materiálu se uvažovalo i provedení simulace procesu tváření, která ukazuje přibližnou podobu výsledků pro reálný proces tažení na zařízení BUP-600.

Po provedení simulace tváření v programu AutoForm R8 bylo provedeno samotné tažení plechů na zařízení BUP-600. Tvářené plechy shodného materiálu se liší tloušťkami. Pro diplomovou práci byly vybrány tloušťky plechů 3 mm, 1,5 mm a 1 mm. Materiálem je nerezová ocel 1.4376. Na zařízení se prováděly 3 odlišné způsoby tažení plechů. První test tažení se nazývá LDH (neboli limiting dome height) a je u něj využita brzdící drážka. LDH test se provádí tažením plechu kulovým tažníkem dokud není dosaženo limitu (porušení) plechu. Test byl proveden pro všechny 3 tloušťky plechu. Další dva způsoby tažení se řídí podle Erichsena a liší především průměry kulových tažníků. Tažení podle Erichsena nevyužívá brzdící drážku a neprovádí se běžně pro tloušťky plechů nad 2 mm.

Po provedení procesu tažení se připravily vzorky pro posuzování mechanických vlastností. Proces přípravy vzorků se skládá z rozřezání výtažků na požadované segmenty pomocí přímočaré pily, dále se vzniklé segmenty zalisují do pryskyřice a po zalisování je nutné vzorek vybrousit, aby bylo možné měřit mechanické vlastnosti. Celkem se zhotovily 3 vzorky pro plech tloušťky 3 mm, 2 vzorky pro plech 1,5 mm a 2 vzorky pro plech tloušťky 1 mm.

Připravené vzorky s vybroušenou ploškou se měří na mikro kombi testeru od firmy CSM s pomocí dodávaného softwaru. Na zařízení je vyhodnocena nejen vtisková tvrdost H_{IT} a tvrdost dle Vickerse, ale i vtiskový modul pružnosti E_{IT} , práce plastických a elastických složek vnikacího procesu nebo vtiskové tečení C_{IT} .

Výsledky měření poukazují na změnu jednotlivých mechanických vlastností v samostatných částech výtažků a mohou detekovat nejrizikovější místa tažení, u kterých dochází ke vzniku defektů. Na výsledné vlastnosti má vliv nejen způsob tažení, samotná geometrie výrobku a tažného nástroje spolu s pomocnými částmi jako jsou například brzdící drážky, ale i výběr materiálu a jeho tloušťka.

Měření plechů pro metodu LDH bylo posuzováno na 6-ti oblastech tažení. Posuzují se mechanické vlastnosti v místě netvářeného plechu, v místě brzdné drážky, na počátku tažení požadovaného tvaru, v průběhu tažení a v místě maximální hloubky tažení.

Segmenty výtažku (vytvořené pomocí Erichsenovy metody) se rozdělují pouze na 4 oblasti. Důvodem nižšího počtu posuzovaných oblastí (oproti metodě LDH) je nevyužití brzdné drážky a odlišné geometrie výtažku.

7 VÝBĚR PLECHŮ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ

Vzhledem k povaze procesu hlubokého tažení se uvažuje polotovár ve formě plechu. U materiálu je vyžadována vysoká pevnost, tažnost a zároveň zachování nízké hmotnosti. S výhodou se využívají nerezové plechy, které jsou odolné proti korozi. Dalším uvažovaným parametrem je schopnost materiálu absorbovat deformační energii, což se využívá u jednotlivých dílů automobilových karoserií.

7.1 Ocel EN 1.4376

S ohledem na požadavky se zvolila korozivzdorná ocel, kterou lze využít pro hluboké tažení. Výběr plechu byl podmíněn normou ČSN EN 10088. Pro diplomovou práci byl zvolen plech z austenitické oceli s označením ČSN EN 1.4376 (X8CrMnNi19-6-3).

Ocel 1.4376 obsahuje množství manganu (Mn), křemíku (Si), síry (S), fosforu (P), kyslíku (O), dusíku (N) a vodíku (H). Hodnoty každého prvku jsou dány normou a nesmí překročit stanovené množství.

Tab. 3 – Chemické složení oceli 1.4376 [67]

Značka	Označení	hm. %							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	N
X8CrMnNi19-6-3	1.4376	0,10	1,00	5,0 - 8,0	0,045	0,015	17,0 - 20,5	2,0 - 4,5	0,30

Norma ČSN EN 10088-2 dále udává mechanické vlastnosti, které jsou důležité pro výběr materiálu při hlubokém tažení. Hodnota meze pevnosti v tahu a hodnota tažnosti jsou dány v Tab. 4.

Tab. 4 – Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 1.4376 [67]

Značka	Označení	max. tloušťka plechu [mm]	Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Tažnost A_{80} [%]
X8CrMnNi19-6-3	1.4376	4	400	600 - 900	40

Vzhledem k nastavení zkušebních metod hlubokého tažení se zvolil stejný materiál pro všechny výtažky. Diference byla řešena změnou tloušťky plechu. V praxi se velmi často řeší změna tloušťky materiálu kvůli snížení hmotnosti při zachování požadovaných mechanických vlastností.

7.2 Tloušťka vybraných plechů

Vzhledem k dostupnosti a výběru plechů byly vybrány plechy materiálu 1.4376 o různé tloušťce. Základní tloušťky plechů uvádí Tab. 5. Pro běžnou výrobu plechů pomocí válcování za studena jsou tloušťky plechů dodávány do tloušťky 4 mm.

Tab. 5 – Vybrané tloušťky plechu

Materiál	Tloušťka plechu [mm]
1.4376	1,0
1.4376	1,5
1.4376	3,0

Jednotlivé pásy plechů požadované tloušťky byly využity pro odlišné zkoušky hlubokého tažení. Plech tloušťky 3 mm slouží pouze pro metodu LDH. V případě Erichsenovy metody je tato tloušťka mimo běžné podmínky zkoušení, a proto se neprováděla. Pro tloušťku 1,5 mm a 1 mm lze provádět zkoušky hlubokého tažení metodou LDH i metodou podle Erichsena (s odlišnými průměry tažníku).



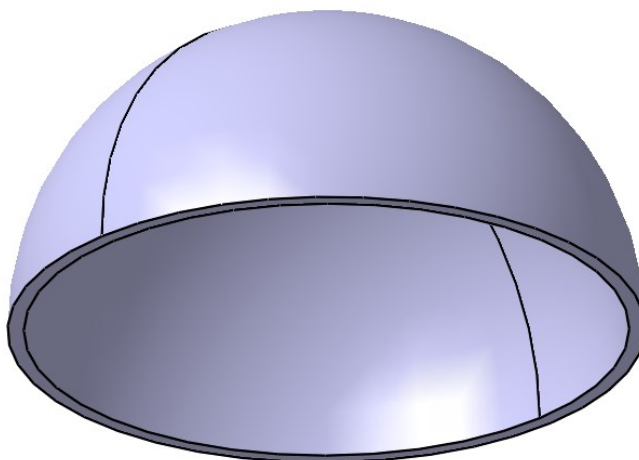
Obr. 52 – Tloušťka plechů z oceli 1.4376 (zleva tloušťka 3 mm, 1,5 mm a 1 mm)

8 SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ

Vzhledem k samotné složitosti procesu hlubokého tažení se s výhodou provádí simulace výrobního procesu v softwaru. Lze nastavovat proces podle dostupného typu zařízení, které umožňuje naplánovat jednotlivé postupy a typy operací, čímž lze eliminovat i chyby při návrhu tvaru, který by nebylo možné správně vyrobit. Software poskytuje možnost použití správného typu materiálu pro danou operaci a dokáže snížit náklady pro potřebný přístřih plechu. Optimalizace přístřihů plechů slouží k zamezení plýtvání přebytečného množství materiálu. Vzniklé vizualizace procesu lze snadno změnit použitím odlišných podmínek tažení, definováním jiného typu materiálu nebo změnou tvaru výtažku. Všechny tyto skutečnosti usnadňují následnou výrobu a dokáží předejít komplikacím a případným ztrátám financí. Samotný software i jednotlivé licence jsou však velmi nákladné, a je tedy nutné zvážit vložené vstupní investice. Výhodou simulací jsou získané výsledky, které poukazují na možné problémy při procesu hlubokého tažení jako je vznik trhlin, ztenčení nebo vlnění plechu. Kombinace nastavení procesních podmínek, zvoleného materiálu a tvaru dílu umožňuje předejít následným chybám.

8.1 Model součásti

Proces tažení se prováděl podle Erichseny a podle metody LDH. V případě Erichsenovy metody dochází k tažení pomocí kulového tažníku o průměru 20 mm a 28 mm. U metody LDH je vtláčován kulový tažník s průměrem 70,2 mm. Aby bylo možné provést simulaci, je nutné vymodelovat kopule, které svými rozměry odpovídají kulovým tažníkům reálného procesu.



Obr. 53 – 3D model výtažku v programu NX (Erichsen 28 mm)

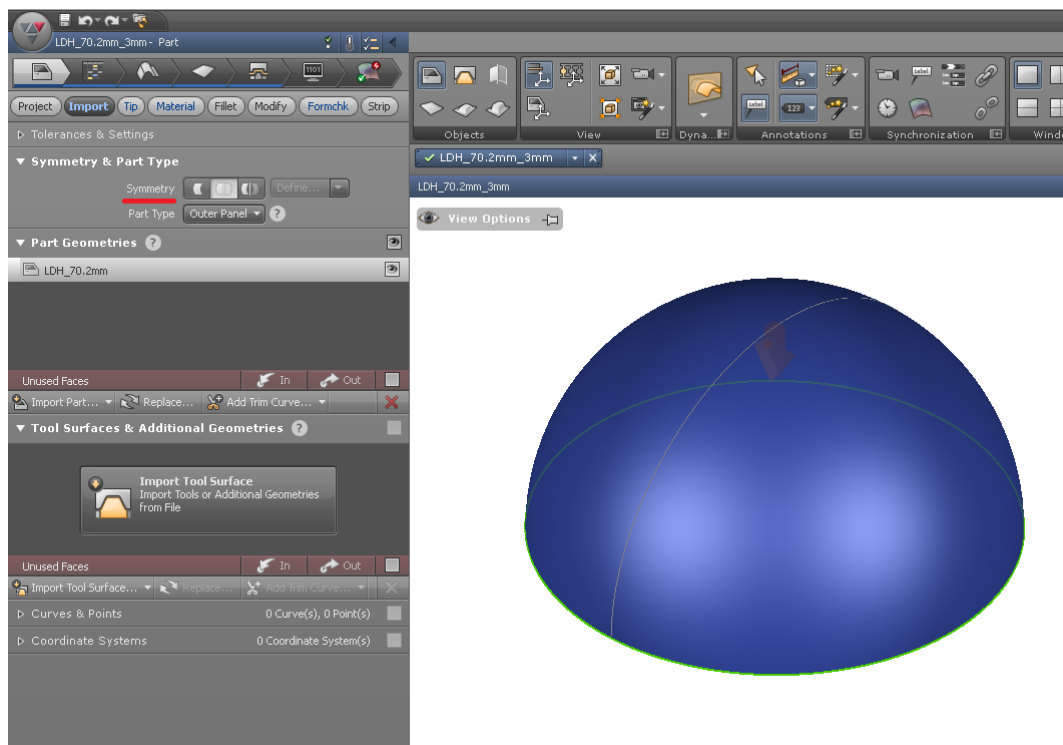
Výtažky ve tvaru kopule byly vytvořeny v programu NX od společnosti Siemens. Vymodelované výtažky byly následně uloženy ve formátu souboru s příponou stp. Takto uložený soubor lze vložit do simulačního programu.

8.2 AutoForm R8

Simulace byla nastavena v programu AutoForm R8 od společnosti AuroForm. Program umožňuje simulaci celého procesu tažení i s ostřížením tvarů a s následným ohýbáním. Vzhledem k jednoduchosti tvaru dílu bylo nastavení procesu uvažováno pouze pro hluboké tažení bez ostřížení tvaru a samotný výpočet simulace byl vyhodnocen v řádech desítek sekund. Výsledkem simulace je diagram tváritelnosti FLD spolu s bezpečností tažení, velikostí ztenčení plechu v jednotlivých místech a velikostí zvlnění.

8.2.1 Import součástí

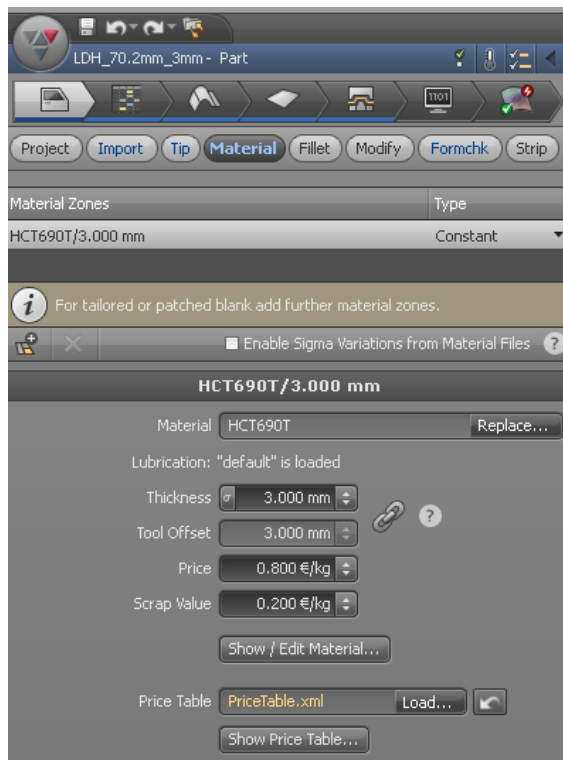
S vytvořeným modelem lze provést import dílu do prostředí AutoForm R8. Vzhledem k symetrii dílu lze využít funkci symetrie, která vloží do středu rovinu symetrie a následně pro simulaci uvažuje shodný tvar obou částí. Dále je nutné určit pomocí označení libovolné plochy směr tažení plechu. Simulace se provádí pro všechny způsoby tažení stejně. Obr. 54 znázorňuje metodu LDH s tažníkem o průměru 70,2 mm pro plech o tloušťce 3 mm.



Obr. 54 – Import dílu s nastavením symetrie a směru tváření pro metodu LDH a tloušťce plechu 3 mm

8.2.2 Přiřazení materiálu

Jednotlivé kroky v programu AutoForm na sebe navazují a nelze mezi hlavními parametry přepínat bez přiřazení parametru. Nastavení procesu tímto předchází chybám v nastavení. Po importování dílu je nutné přiřadit materiál a tloušťku plechu. Materiály lze dohledat v databázi, kterou program AutoForm obsahuje. Zvolený plech z oceli 1.4376 se shoduje s materiálem, který je v programu AutoForm R8 označen jako HCT690T.



Obr. 55 – Volba materiálu HCT690T v programu AutoForm R8

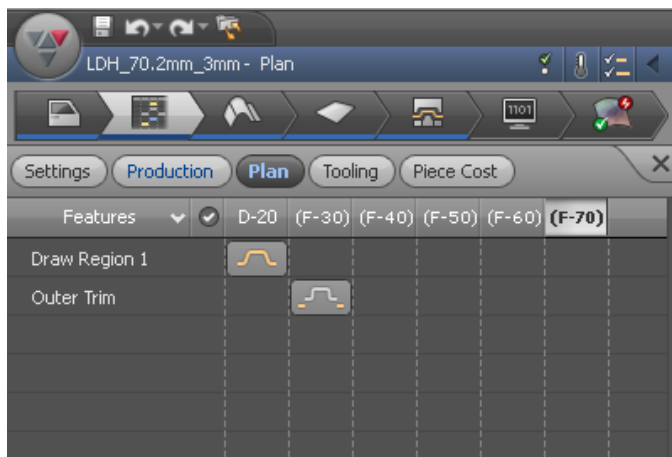
S výběrem materiálu souvisí provedení kontroly (Formcheck), kde dochází ke kontrole následujícího procesu tváření pouze z geometrie samotného dílu. Snahou softwaru je znázornit proces tažení a vyhledat případné chyby v necelistvosti geometrie. Tímto krokem jsou definovány všechny parametry, které se týkají samotné geometrie součásti. Pokud karty programu svítí světle modrou barvou, jsou potvrzeny a neobsahují chyby nebo chybějící data.

8.2.3 Výrobní plán

Hotový díl nebude v reálu ostřížen a používán, protože bude sloužit k rozřezání a následnému vyhodnocení mechanických vlastností. Při běžné výrobě se nastavují jednotlivé kroky jako je tažení, ostřížení nebo vystřížení děr a tvarů. V tomto výrobním

plánu bude nastavena pouze operace hlubokého tažení, čímž se proces simulace značně zjednoduší a zrychlí konečný výpočet.

Hluboké tažení je obsaženo v operaci D-20, ostatní operace tvářecího procesu jsou přeskočeny a nejsou uvažovány. Pokud by bylo požadavkem ostřížení tvaru polokoule, povolila by se operace F-30.

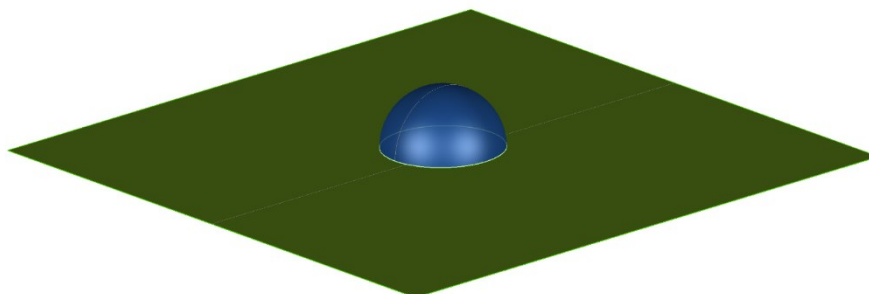


Obr. 56 – Výrobní plán pro hluboké tažení plechu

S výrobním plánem souvisí výběr tvářecího stroje, na kterém bude prováděno hluboké tažení plechu. Program AutoForm obsahuje databázi běžně dostupných tvářecích strojů. Pro simulaci byl zvolen tvářecí stroj PressLine1800T. Tvářecí stroj slouží pouze pro vytvoření simulace, ostatní parametry jsou souhlasné pro zkušební zařízení BUP-600.

8.2.4 Vytvoření tažníku a přídržovače

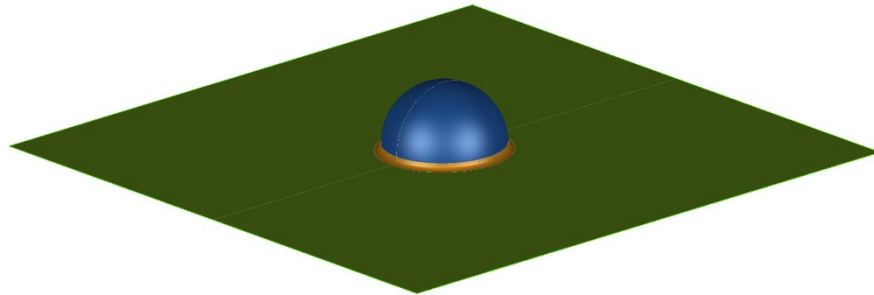
Jednoduchý díl nevyžaduje upravit tažník, proto jej lze zvolit automaticky. Pro optimálnější proces tažení se definuje přídržovač, který byl také zvolen automaticky, a pouze se provedlo odsazení od původní roviny, aby bylo možné simulovat reálný proces.



Obr. 57 – Přídržovač plechu pro hluboké tažení

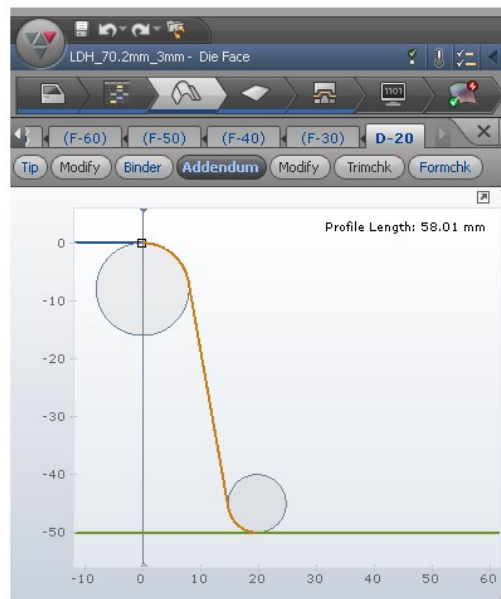
8.2.5 Úprava profilu tažníku

Tažník se upravuje pomocí odsazení se zaoblením, aby mohlo dojít k vytažení správného tvaru. Pokud by nedošlo ke konstrukční úpravě, neodpovídala by simulace následnému reálnému procesu.



Obr. 58 – Konstrukční úprava tažníku

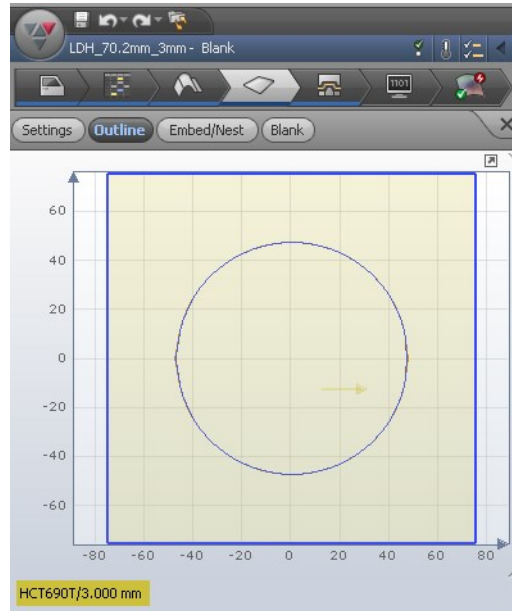
Úprava tažníku se provádí nastavováním průměrů kružnic a vzdáleností šířky mezi kružnicemi. Horní kružnice má poloměr $R = 7$ mm, spodní kružnice má poloměr $R = 5$ mm. Vzdálenost mezi kružnicemi se nastavila na nejnižší možnou hodnotu automaticky.



Obr. 59 – Geometrie zaoblení tažníku

8.2.6 Definice přístřihu plechu

Jako přístřih plechu se zvolil obdélník o rozměrech 150 x 150 mm. Definice rozměrů odpovídala rozměrům reálných přístřihů plechů pro jednotlivé typy zkoušek.

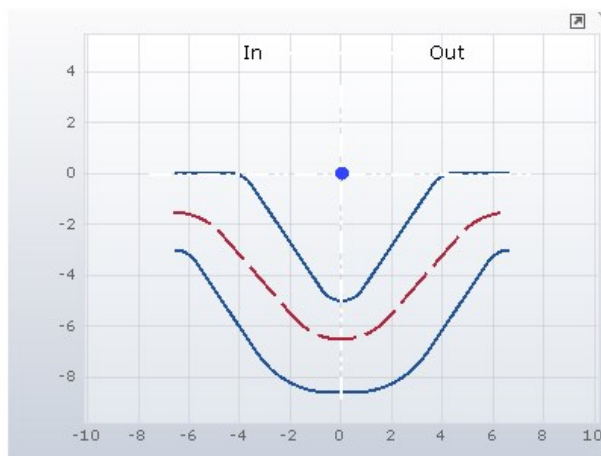


Obr. 60 – Definice přístřihu plechu

8.2.7 Definice brzdících elementů

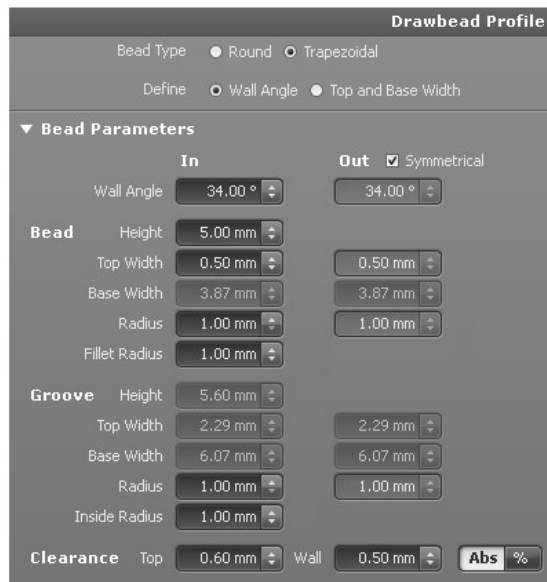
Pro zkoušky hlubokého tažení podle Erichsena se nepoužívají brzdící elementy, proto se v simulaci nedefinují.

Zkouška hlubokého tažení LDH je spojena s využitím brzdících elementů, a je tedy nutné brzdy definovat. Brzda byla nastavena pro simulaci plechu o tloušťce 3 mm, 1,5 mm i 1 mm. Simulace umožňuje nastavení tvaru a hloubku brzdného kanálu. U složitějších dílů je možné využít brzdící strategii, která způsobuje rozdílnou rychlost tažení v kritických místech a je možné předejít defektům v podobě prasklin.



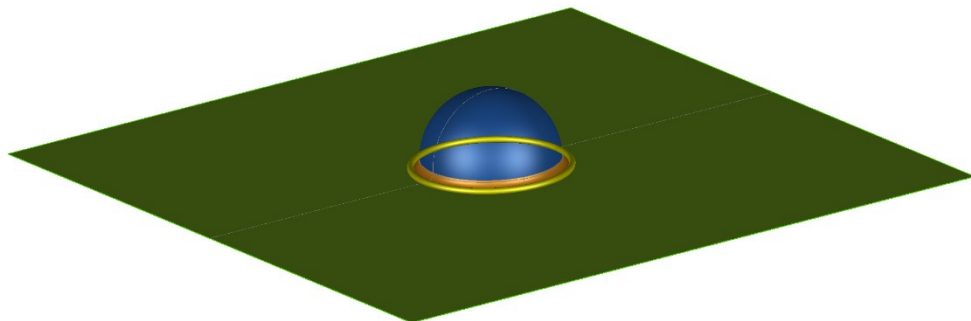
Obr. 61 – Geometrie brzdícího elementu

U tvaru brzdy lze v programu AutoForm definovat veškeré rozměry brzdících elementů. Definuje se samotná drážka i brzdící element. Na Obr. 62 je znázorněno aplikované nastavení pro brzdící elementy.



Obr. 62 – Nastavení brzdících elementů

V simulačním prostředí se vykreslí brzdy podle uživatelského nastavení a lze je kdykoliv změnit. Účinek brzdy se redukuje podle výsledků a vizualizace simulace.



Obr. 63 – Brzda v prostředí programu AutoForm R8

8.3 Výsledky simulace - Tvářitelnost

Jednotlivé výsledky simulace se vyhodnocují dle nastavených parametrů v prostředí AutoForm R8. Výše zmíněný postup procesu simulace byl nastaven pro jednotlivé typy zkoušek dle Erichsena, i pro metodu LDH s brzdícími elementy. Postup je shodný pro všechny typy výtažků, proto není nutné popisovat každý postup zvlášť.








Odlišnosti simulací pro jednotlivé tloušťky plechů lze diskutovat až v případě výsledků, které se svými hodnotami budou vzájemně lišit.

Výpočet lze u simulací nastavit zjednodušený (označení CE) nebo celkový (označení CE⁺). Pro popsání jednotlivých výtažků bylo nezbytné zvolit výpočet všech parametrů. Mezi nejdůležitější hodnocené parametry patří:

- Tvářitelnost (FLD).
- Porušení (Max failure).
- Zvlnění (Wrinkles).
- Ztenčení (Thinning).

Tvářitelnost

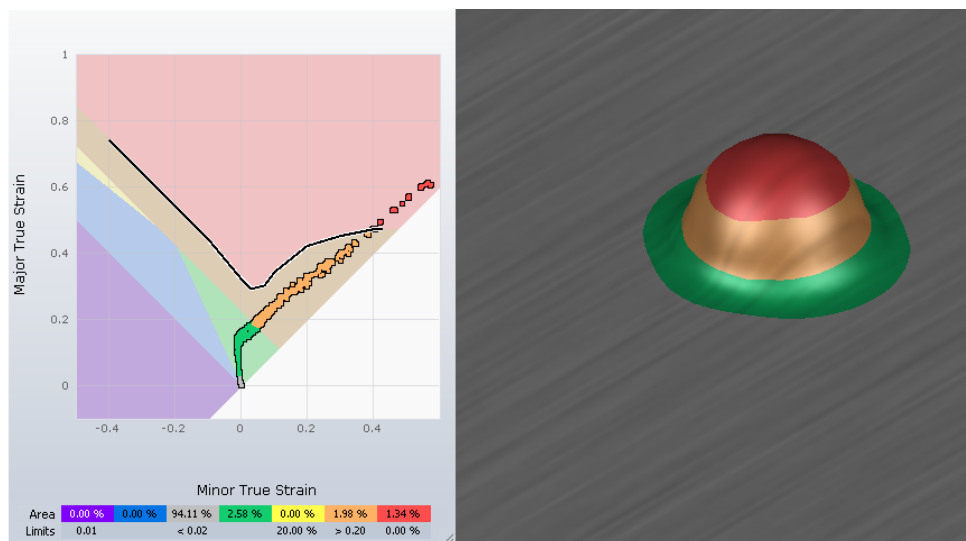
Pro posouzení tvářitelnosti slouží FLD diagram neboli limitní diagram tvářitelnosti, který posuzuje vhodnost lisovatelnosti plechu vzhledem k nastaveným parametrům procesu tváření. Základem procesu je dosažení co nejvyšší procentuální hodnoty v zelené oblasti (bezpečná oblast). Cílem této práce není eliminace nebezpečných oblastí, ale měření výsledných hodnot mechanických vlastností, proto dochází ke vzniku nebezpečných oblastí porušení, které jsou vyznačeny červenou a oranžovou barvou.

	Thickening	- ztenčení plechu
	Compress	- stlačení (komprese)
	Insuff Stretch	- nedostatečné využití plechu
	Safe	- bezpečná oblast
	Risk of splits	- oblast možného vzniku trhlin
	Excess thinning	- nadměrné ztenčení
	Splits	- vznik trhlin

Obr. 64 – Popis oblastí FLD diagramu

8.3.1 Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5)

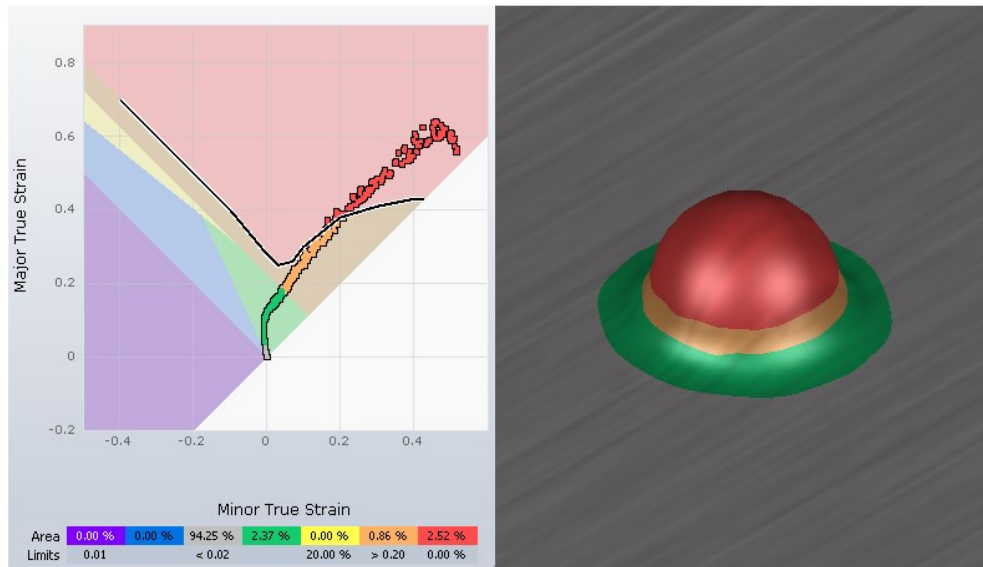
Pro zkoušku hluboko tažnosti podle Erichsena byl definován tažník pro běžnou zkoušku s průměrem 20 mm. Prvním simulovaným plechem byl 1.4376 o tloušťce 1,5 mm. Z hlediska tváritelnosti leží 94,11 % v oblasti nevyužitelnosti plechu, a to z důvodu velkého přístřihu plechu. Červená oblast vzniku trhlin o velikosti 1,34 % se nachází v horní části výtažku, což odpovídá nejčastějšímu problému s utržením dna vlivem špatně nastavených podmínek výroby. Pokud by bylo cílem práce vyrobit díl bez vad, uvažovala by se změna materiálu, případně využití brzdících elementů. Výsledek slouží k porovnání reálného procesu vzhledem k simulaci tváření, což potvrzuje oblast, ve které dojde k porušení.



Obr. 65 – FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E20TL1,5

8.3.2 Erichsen – 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1)

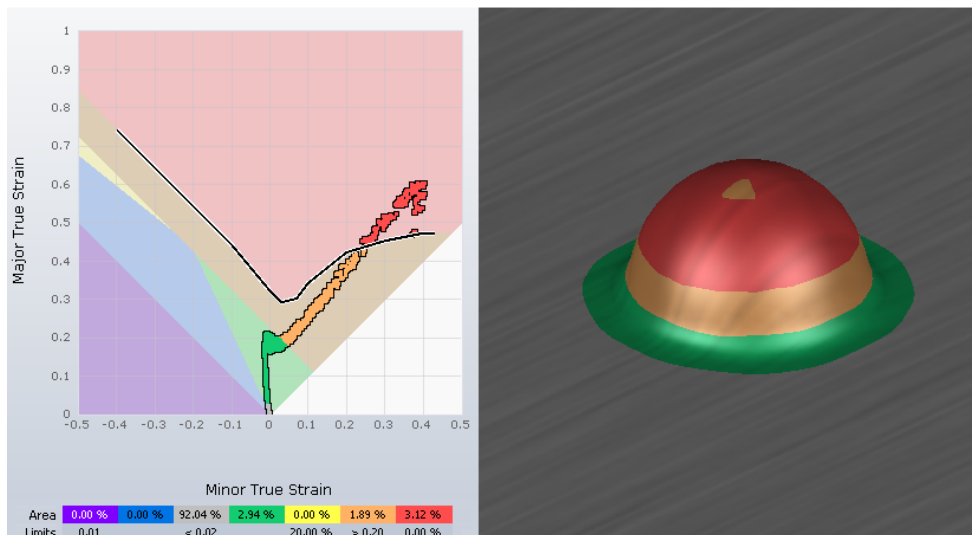
Pro další simulaci byl využit stejný průměr tažníku, ale tloušťka plechu klesla na 1 mm. Podle vizualizace tváritelnosti se u snižující se tloušťky plechu zvětšuje nebezpečná oblast porušení a dojde ke vzniku trhliny podstatně dříve, než v případě plechu tloušťky 1,5 mm. Celý proces simulace byl pro plech tloušťky 1,5 mm (i 1 mm) nastaven dle podmínek tváření, aby nedošlo k ovlivnění výsledků dalšími parametry.



Obr. 66 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E20TL1

8.3.3 Erichsen – 28 mm, tl. 1,5 mm (E28TL1,5)

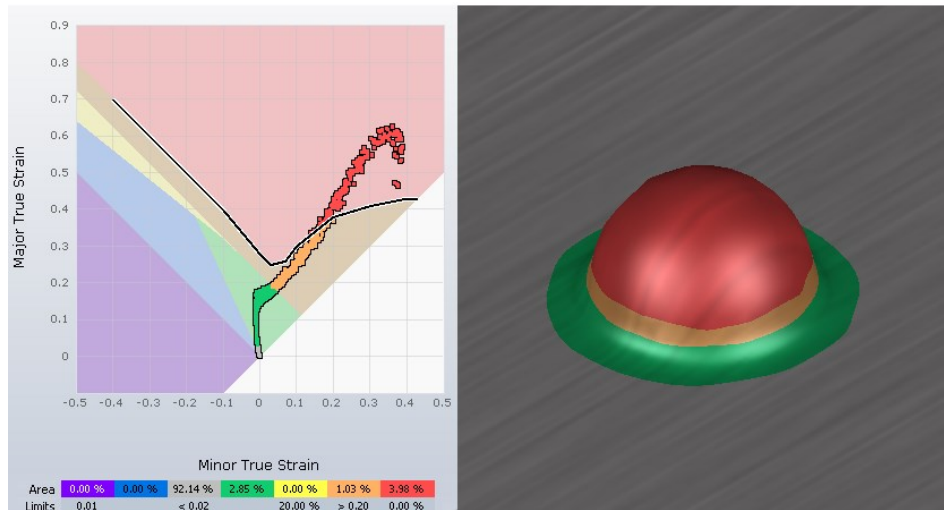
Při zvětšení tažníku na průměr 28 mm se nebezpečná oblast, oproti shodnému plechu s tažníkem o průměru 20 mm, zvětší. Použití většího průměru tažníku opět neovlivňuje oblast počátku tažení polokoule a tato oblast leží v bezpečné (zelené) zóně. Jednotlivé oblasti výtažku budou vlivem nastavení procesu vykazovat odlišné mechanické vlastnosti, což se následně projevuje případným vznikem trhlin nebo dokonce odtržením horní části kopule.



Obr. 67 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E28TL1,5

8.3.4 Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)

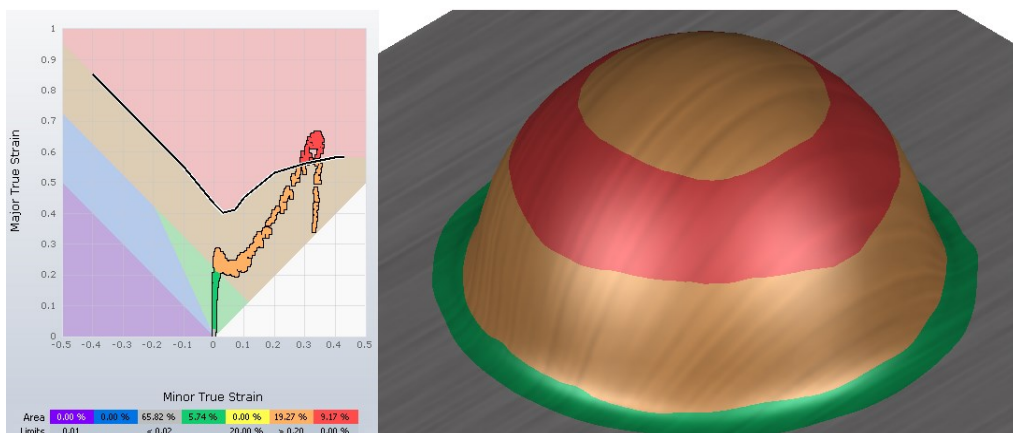
Snižující se tloušťka plechu značně zvýšila kritickou oblast, která vzrostla ke 4 %. Začátek tažení plechu se u všech případů nachází v bezpečné oblasti, což umožnila především konstrukční změna tažníku.



Obr. 68 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E28TL1

8.3.5 LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)

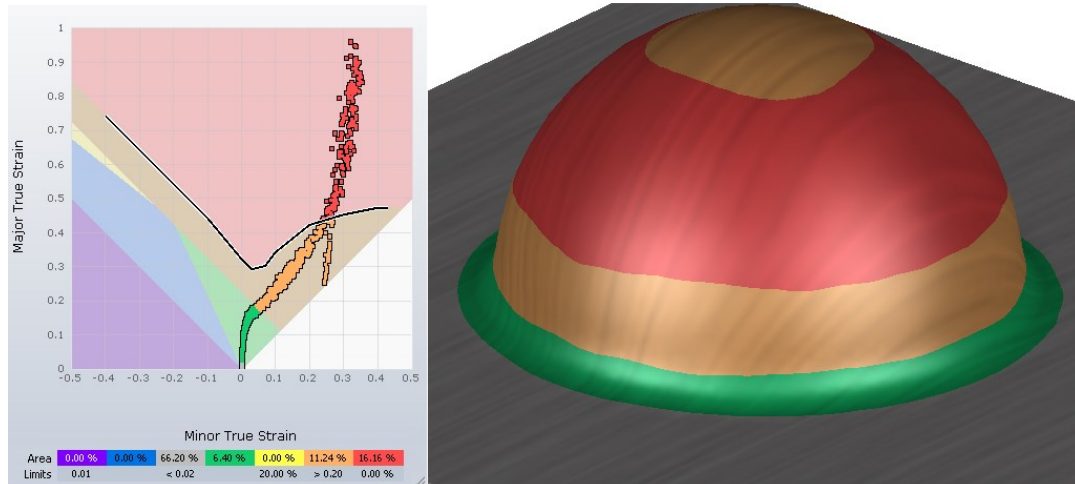
Zkouška tvářítečnosti plechu metodou LDH s brzdými drážkami se odlišuje průměrem tažníku 70,2 mm. Hodnota nebezpečné oblasti přesahuje 9 % a oblast možného vzniku trhliny dosahuje téměř 20 %. Brzdné drážky jsou nastaveny na hodnotu 1 a dochází k maximálnímu brzdnému účinku. Při reálném pokusu se brzdící element na přístřihu plechu vytlačí. Simulace i přes nastavené parametry nevykreslí vizualizaci brzdy.



Obr. 69 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL3

8.3.6 LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)

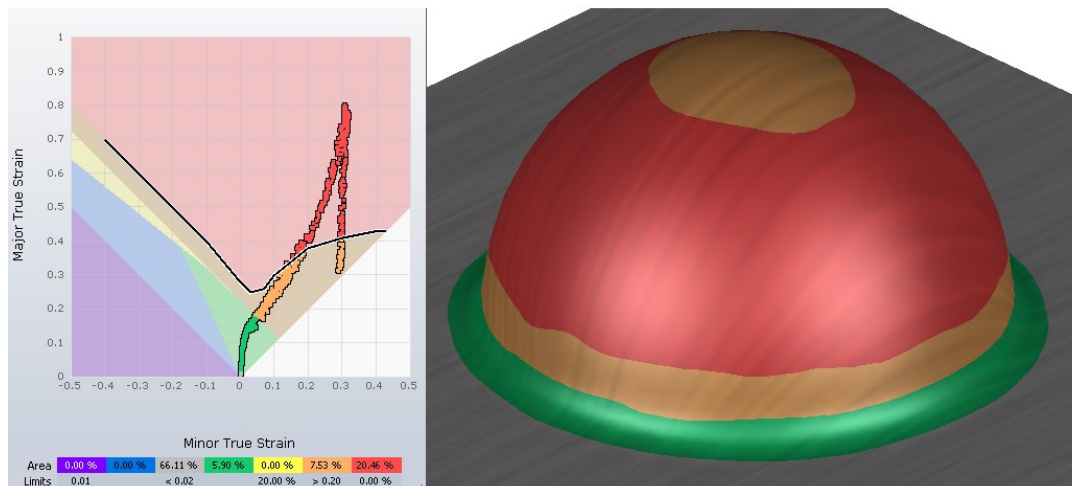
Snižující se tloušťka plechu i u metody LDH poukazuje na zvětšující se kritickou oblast porušení (přesahující 16,16 %). Dle výsledků se nejvyšší napětí nachází během tažení volné plochy kopule. V horní části výtažku se napětí snižuje,



Obr. 70 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL1,5

8.3.7 LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)

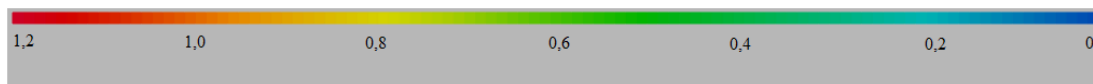
Při tloušťce plechu 1 mm se kritická oblast zvětšila na 21 %, čímž dochází k dalšímu zvětšování oproti větší tloušťce plechu.



Obr. 71 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL1

8.4 Výsledky simulace – Max failure

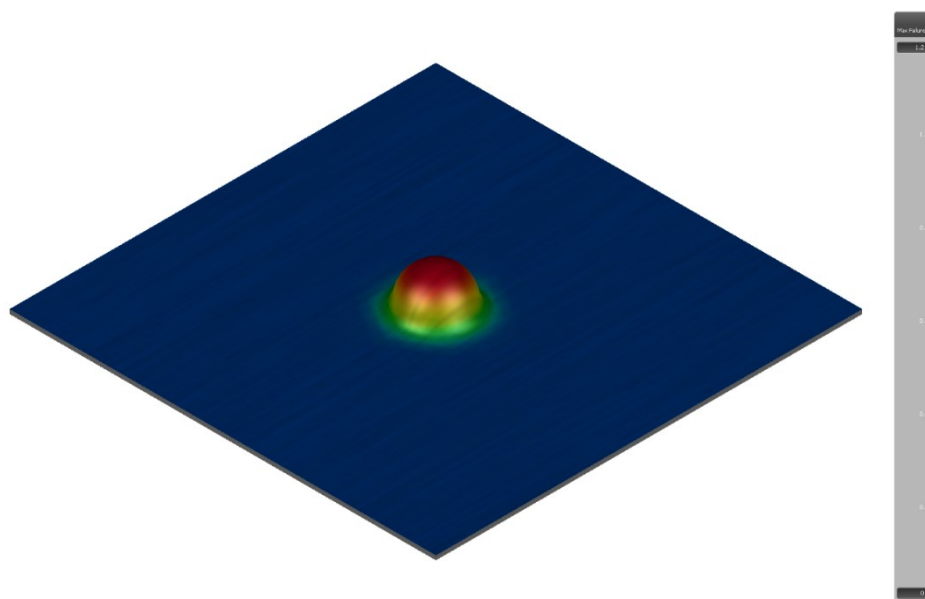
Hodnota maximálního porušení (Max failure) udává procentuálně velikost porušení výtažku. Barevná stupnice je dána standardně mezi hodnotami 0 až 1 a slouží pro snadnější identifikaci problémů při tváření plechových dílů. V případě překročení hodnoty 1 se jedná o závažné porušení a dochází k roztržení výtažku. Každý bod lze prověřit samostatně a určit vzniklý problém. Jeden výsledek simulace nemusí znamenat zásadní problém, a proto záleží na zadaných podmínkách. Např. hodnota maximálního porušení může přesáhnout stanovený limit (běžně 0,8), ale hodnota ztenčení plechu se nachází pod limitem. Takový případ vyžaduje podrobnější zkoumání problému v daném místě a posouzení dle zadaných podmínek.



Obr. 72 – Stupnice maximálního porušení

8.4.1 Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5)

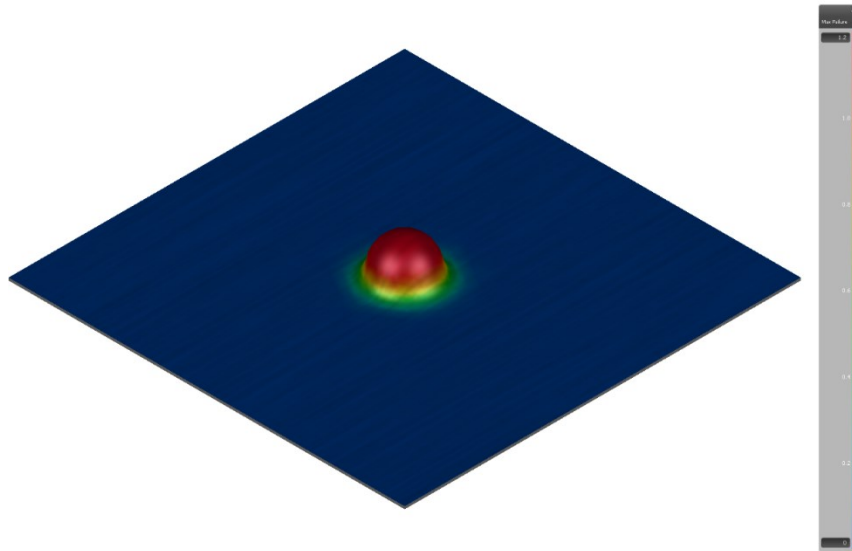
Spolu s FLD diagramem a tvářitelností souvisí hodnota porušení (Max failure). Riziková oblast porušení se nachází v horní části výtažku, což opět nasvědčuje nebezpečí utržení dna výtažku. Vysoké napětí se akumuluje a následně se projeví vznikem trhliny, která se zvětší a poruší výtažek. Opět bude cílem vyhodnotit změnu mechanických vlastností v průběhu hlubokého tažení plechu a určit důvody nejčastějšího porušení dílu. Hodnota porušení přesahuje v horní oblasti hodnotu 1,0 a dosahuje nejvyšší hodnoty 1,2.



Obr. 73 – Maximální porušení výtažku (E20TL1,5)

8.4.2 Erichsen – 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1)

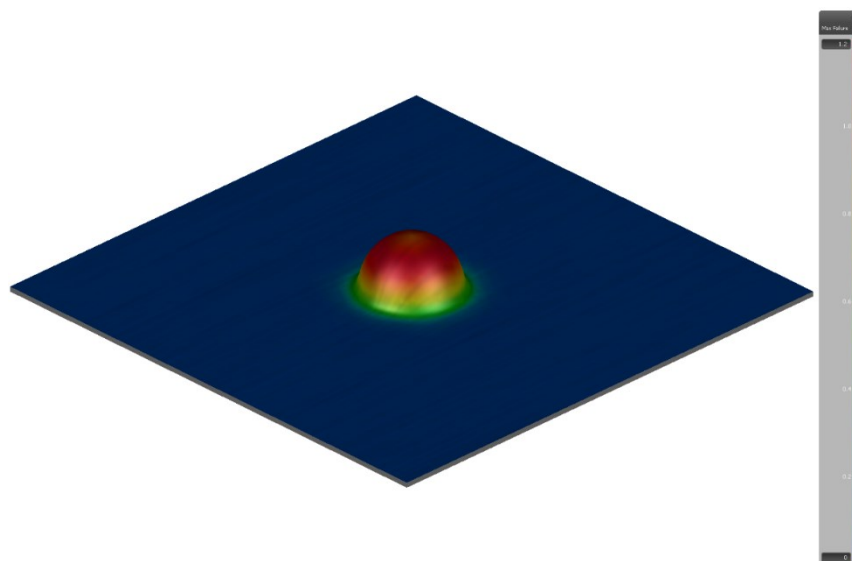
Hodnota maximálního porušení se nemění, ale dochází ke změně velikosti oblasti, ve které se maximální porušení projevuje. Oblast s možným výskytem (oranžová oblast) se přeměnila z velké části na oblast porušení (červená oblast). Prístřih plechu má na většině oblasti modrou barvu, která nabývá hodnoty 0, protože nedochází k žádnému tváření a jedná se o nevyužitý plech.



Obr. 74 - Maximální porušení výtazku (E20TL1)

8.4.3 Erichsen – 28 mm, tl. 1,5 mm (E28TL1,5)

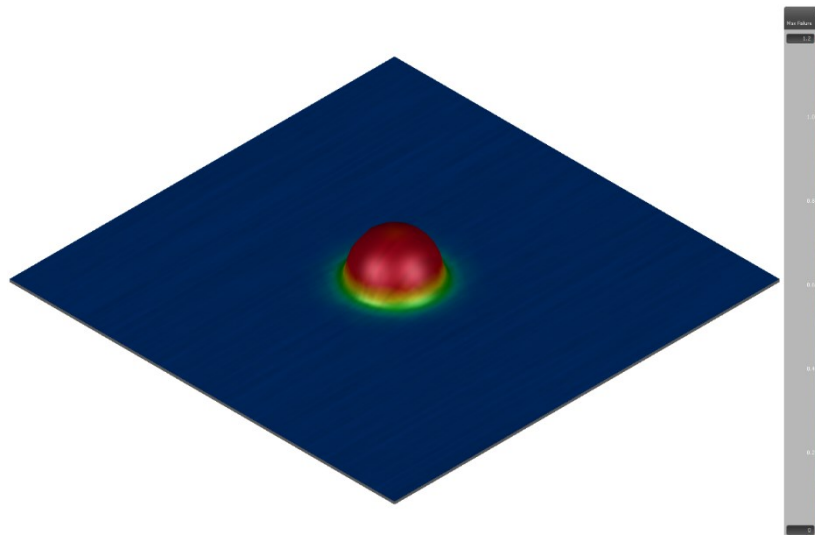
Pro Erichsenovu metodu (s tažníkem o průměru 28 mm) zůstává maximální hodnota porušení shodná jako v případě tažníku o průměru 20 mm. Průběh porušení odpovídá diagramu tváritelnosti, kdy horní oblast není místem s nejvyšší hodnotou porušení. Předpokládaná změna mechanických vlastností by měla být nejvýraznější v červené oblasti.



Obr. 75 - Maximální porušení výtazku (E28TL1,5)

8.4.4 Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)

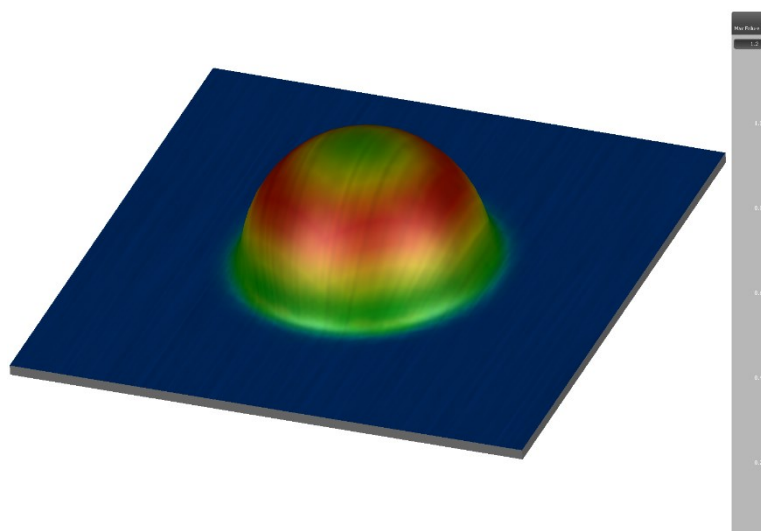
Menší tloušťka plechu způsobuje značný problém pro správné nastavení procesu tváření plechů, aniž by nedocházelo ke vzniku vad. Velikost nebezpečné oblasti pokrývá téměř celou kopuli výtažku. Hodnota porušení 1,2 poukazuje na velmi vysoké riziko vzniku porušení vlivem hromadění vnitřního napětí během procesu hlubokého tažení.



Obr. 76 - Maximální porušení výtažku (E28TL1)

8.4.5 LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)

Pro konkrétní metodu zkoušení LDH se hodnota porušení značně nesnižuje, ale zabírá menší oblast. Zmenšení oblasti umožnilo využití brzdících elementů, které umožňují lépe táhnout složité tvary, aniž by docházelo k porušení nebo vzniku trhlin. Výsledek analýzy (Max failure) neukazuje otisk brzdícího elementu jako je tomu v reálném případě. Lepších výsledků je dosaženo větší tloušťkou plechu, kdy nedochází vlivem objemu materiálu ke vzniku poruch.

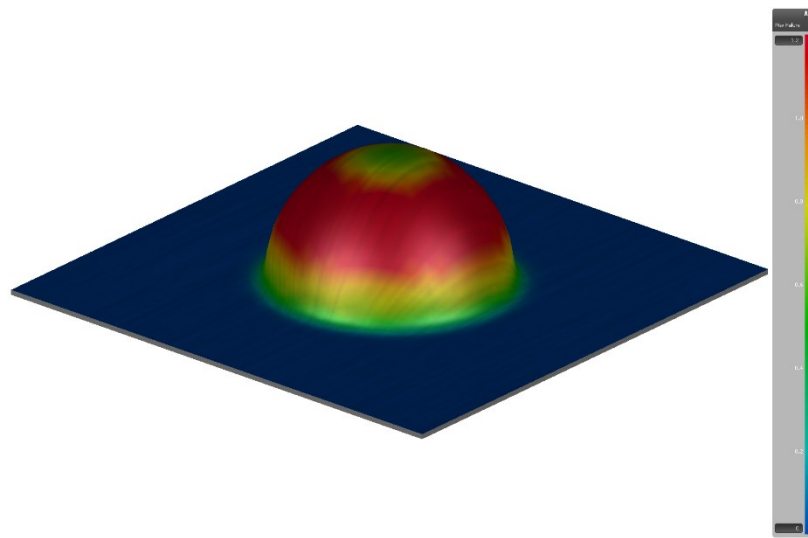


Obr. 77 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL3)

Řešením problémů není zvětšování tloušťky dílů, ale optimalizace výrobního procesu a využití materiálů s lepšími mechanickými vlastnostmi. Velká tloušťka plechu by způsobila nemožnost vyrábět složité tvary s požadovanou přesností, a navíc by značně narostla hmotnost jednotlivých dílů.

8.4.6 LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)

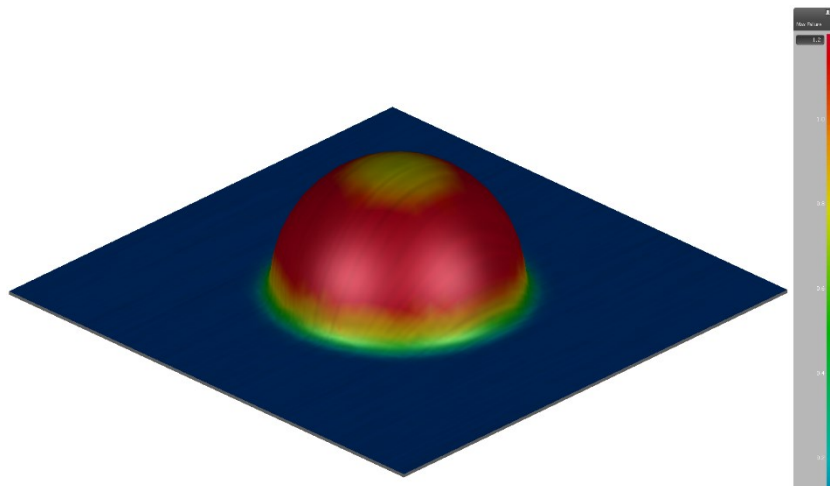
Pro stejné nastavení procesu simulace, jako v případě plechu o tloušťce 3 mm, dochází k nárůstu vnitřního napětí v materiálu, a je tedy pravděpodobnější vznik trhlin. Hodnota maximálního porušení narůstá na maximum 1,2 v celé oblasti porušení.



Obr. 78 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL1,5)

8.4.7 LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)

Tloušťka plechu 1 mm, pro shodně nastavené podmínky jako u všech předchozích operací, poukazuje na růst nebezpečné oblasti. Maximální hodnota poškození opět dosahuje hodnoty 1,2.



Obr. 79 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL1)

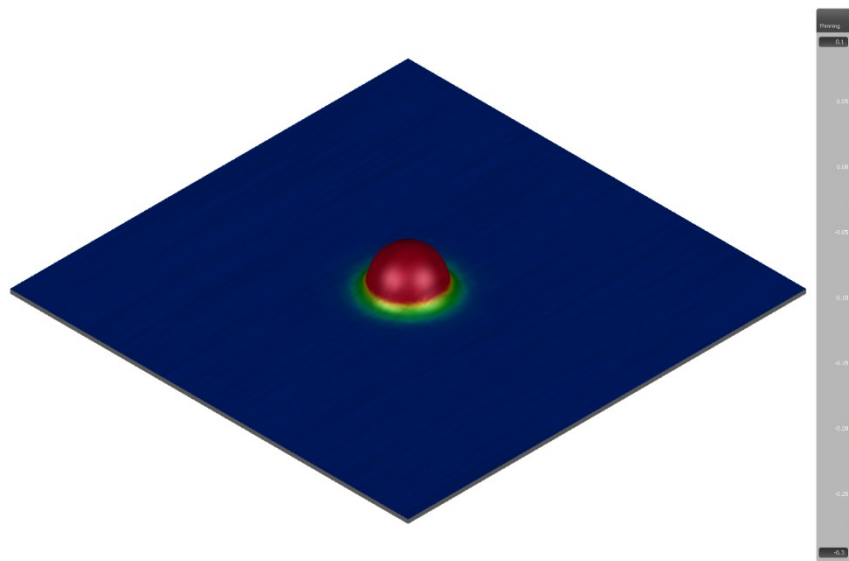
8.5 Výsledky simulace – Thinning

Podle způsobu nastavení simulace lze získat výsledky vyjadřující ztenčení plechu v jednotlivých oblastech vlivem procesu hlubokého tažení. Parametr ztenčení ovlivňuje mechanické vlastnosti výtazku a může způsobovat nebezpečí pro další využití dílu ve výrobě. Plechový díl ovlivněný ztenčením nebude vykazovat nejen požadovanou pevnost, ale při požadavku deformace u automobilových dílů nemusí splnit předepsanou funkci, čímž dojde k ohrožení samotných životů cestujících. Parametr ztenčení je nezbytné během procesu sledovat, aby bylo možné produkovat jakostní výrobky bez možných vad.

Ztenčení je charakterizováno barevnou škálou s hodnotami, které vyjadřují procentuální ztenčení tloušťky plechu. Simulace vychází z FEM modelu, který je složen z jednotlivých elementů. Pro snadnější identifikaci vzniklých problémů jsou místa výtazků označena barvou dle míry ztenčení.

8.5.1 Erichsen - 20 mm, tl. 1,5 mm (E20TL1,5)

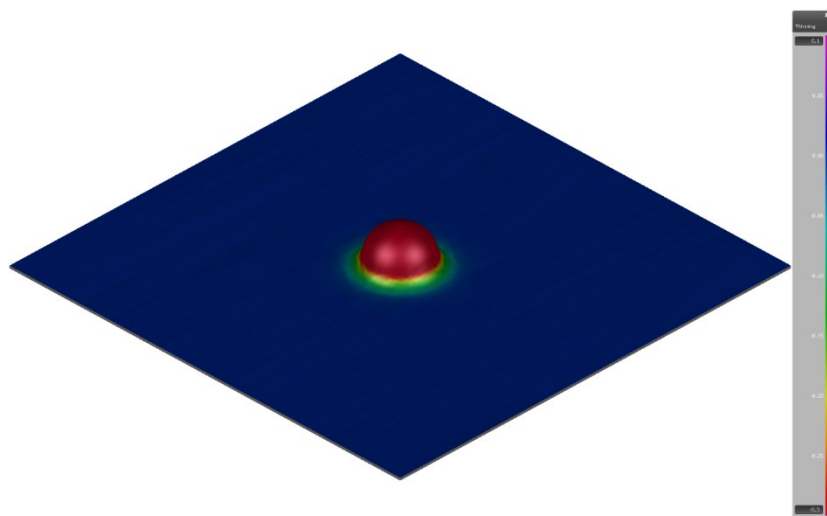
Výsledky ztenčení neboli thinning ukazují kladné i záporné hodnoty ztenčení. V místech s růžovou barvou došlo k nahromadění materiálu, které ukazuje zvětšení o 10 % původní tloušťky 1,5 mm. V místě tažení kopule se ztenčení plechu pohybuje okolo 30 %. Tato hodnota je způsobena tlačáním tažníku do plochy plechu a zároveň natahováním plechu do požadovaného tvaru. Vzhledem k velké změně tvaru je následné ztenčení při nastavených podmínkách adekvátní a očekávané.



Obr. 80 – Ztenčení tloušťky stěny výtazku (E20TL1,5)

8.5.2 Erichsen - 20 mm, tl. 1 mm (E20TL1)

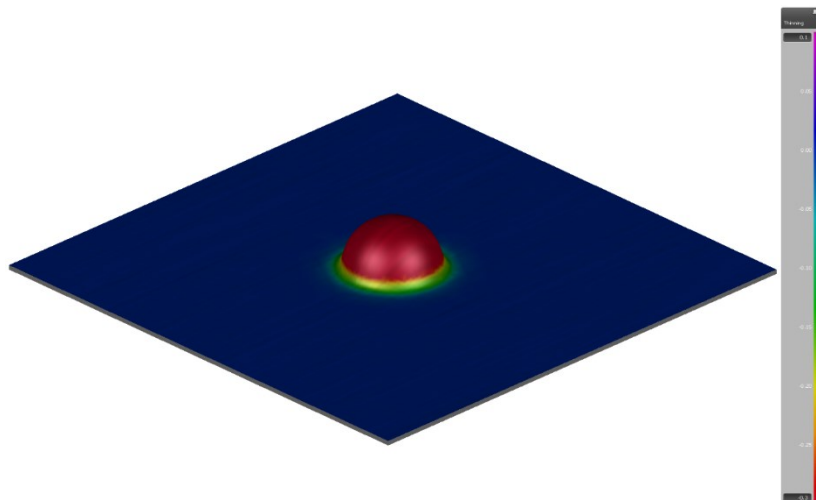
Změna tloušťky plechů se v případě rozdílné tloušťky plechů na barevné škále neodlišuje a na první pohled dochází k získání podobných výsledků. Výsledky jsou však spojeny s procentuálním zúžením vzhledem k původní tloušťce. Zúžení velikosti 30 % znamená pro plech tloušťky 1 mm velikost zúžení 0,3 mm. Prošetření vybraných bodů zvláště umožňuje bližší identifikaci procesu, což ale není náplní práce, a proto jsou zobrazené výsledky dostačující. Základem je získání vizualizace a přibližného chování plechu, které ovlivní zjišťované mechanické vlastnosti.



Obr. 81 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E20TL1)

8.5.3 Erichsen – 28 mm, tl. 1,5 mm (E28TL1,5)

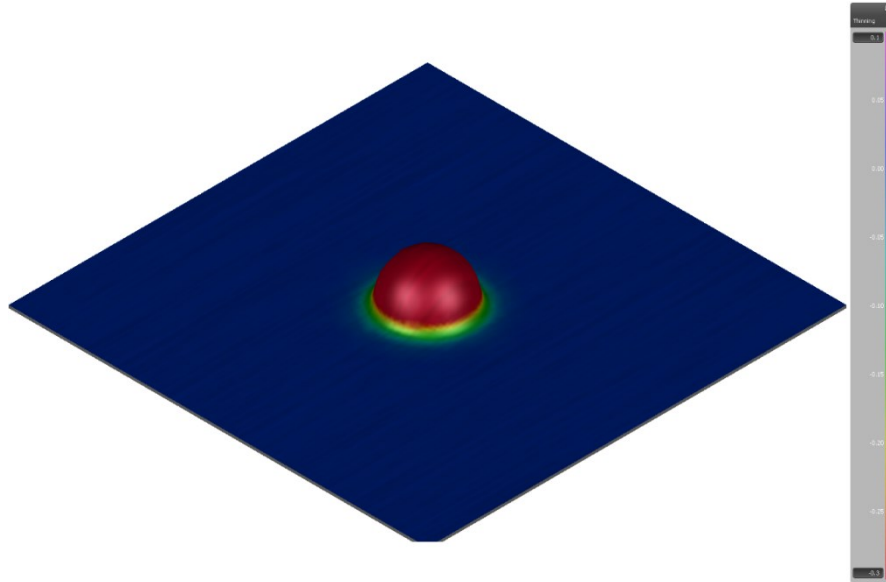
Výsledné hodnoty ztenčení (zkouška podle Erichsena s tažníkem o průměru 28 mm) dosahují podobných výsledků jako v případě využití tažníku o průměru 20 mm pro stejný plech. Odlišuje se žlutá oblast ztenčení o velikosti 20 %, která zabírá větší plochu na počátku tažení, což je ovlivněno použitím většího průměru tažníku, který ovlivňuje geometrii tažení.



Obr. 82 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E28TL1,5)

8.5.4 Erichsen – 28 mm, tl. 1 mm (E28TL1)

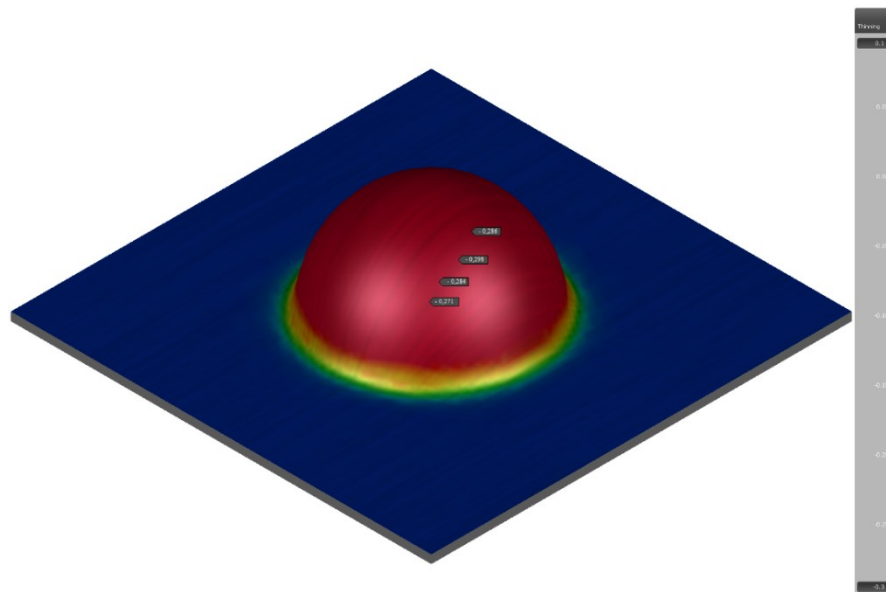
Maximální ztenčení plechu dosahuje 30 % z tloušťky plechu 1 mm. Žlutá oblast (označující ztenčení 20 %) se shoduje s oblastí stejně jako v případě plechu o tloušťce 1,5 mm.



Obr. 83 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E28TL1)

8.5.5 LDH – 70,2 mm, tl. 3 mm (LDH70,2TL3)

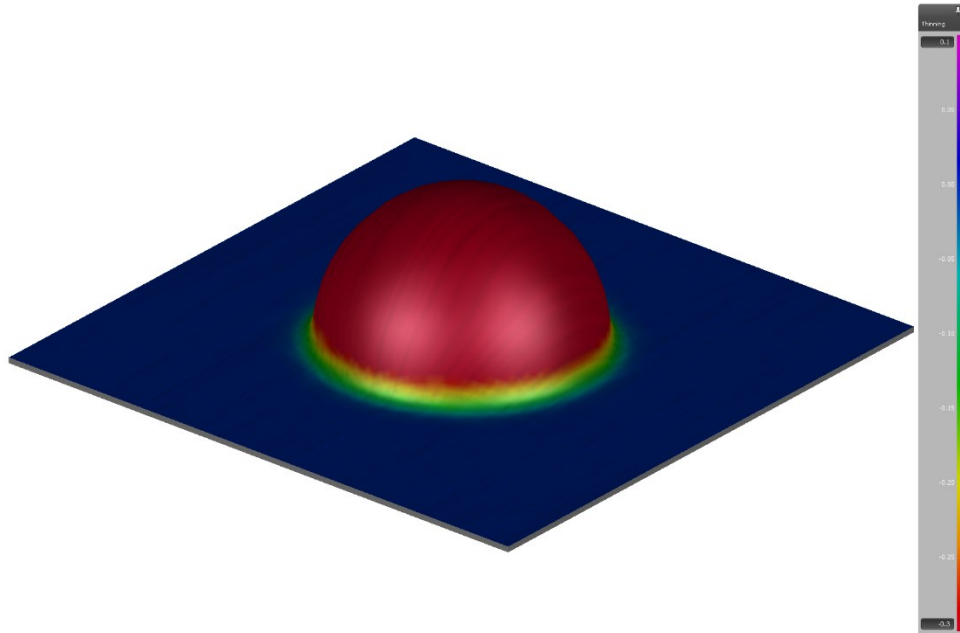
V případě zkušební metody LDH dochází ke ztenčení plechu opět v maximální hodnotě 30 %, avšak z tloušťky plechu 3 mm. Zde bylo ukázáno prošetření 4 bodů, u kterých se hodnoty přibližují hodnotě 0,3 na uvedené stupnici.



Obr. 84 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL3)

8.5.6 LDH – 70,2 mm, tl. 1,5 mm (LDH70,2TL1,5)

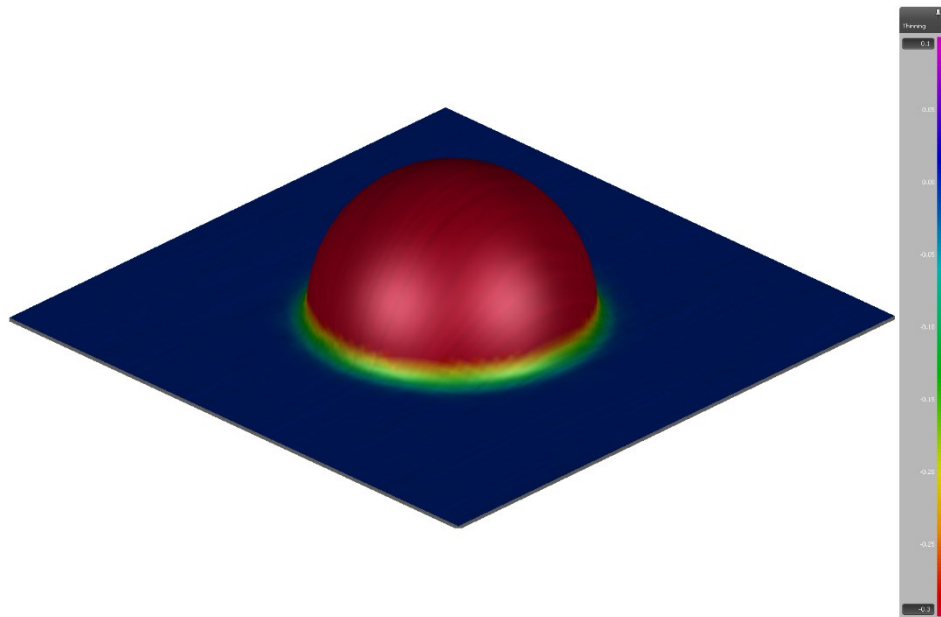
Pro tloušťku plechu 1,5 mm odpovídá vizualizace předchozímu případu s plechem o tloušťce 3 mm. Liší se pouze hodnota velikosti ztenčení (maximálně 30 % z tloušťky plechu).



Obr. 85 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL1,5)

8.5.7 LDH – 70,2 mm, tl. 1 mm (LDH70,2TL1)

Parametr ztenčení dle vizualizace nevykazuje změny mezi jednotlivými plechy pro zkoušení metodou LDH. Rozdílem zůstává pouze hodnota ztenčení vůči tloušťce plechu.



Obr. 86 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL1)

8.6 Příprava vzorků pro měření

Simulace pro jednotlivé tloušťky plechu (z materiálu 1.4376) potvrzuje možnost výroby výtažků na zařízení BUP-600. Výsledky umožňují použití zvoleného typu materiálu, který slouží pro výrobu dílů hlubokým tažením. Jednotlivé výsledky simulace slouží pro předpoklad změny mechanických vlastností různých oblastí výtažků. Proces přípravy vzorků zahrnuje vytažení požadovaného výtažku dle jednotlivých metod (Erichsenova a LDH metoda) na zařízení BUP-600 pro jednotlivé tloušťky plechů. Následuje provedení vyřezání oblastí, na kterých lze posuzovat odlišnosti mechanických vlastností. Řezání je nutné provádět na přímočaré pile, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků, a tím ke změně zkoumaných mechanických vlastností. Připravené preparáty plechu by v tomto stavu nebylo možné zkoumat, a proto je nutné provést zapouzdření a následné vybroušení zkoumané plochy vzorků. Pro zapouzdření slouží lis pro přípravu vzorků. Materiálem, do kterého se preparáty zalisují, je pryskyřice ve formě prášku. Po provedení zapouzdření na lisu se vzorky přesunou na brusné zařízení, kde dojde k vybroušení plochy pro následné měření.

Celkem se připravilo 6 samostatných metalografických vzorků, pro které se vyhodnotily jednotlivé oblasti výtažků pro každou tloušťku plechu.

8.6.1 Příprava plechů

Pro vybrané plechy materiálu 1.4376 byl ostřížen přibližný rozměr šířky 150 mm a délky 600 mm. Rozměry se přibližně shodují pro všechny tloušťky plechů.



Obr. 87 – Plech materiálu 1.4376

8.6.2 Hluboké tažení plechu na zařízení BUP-600

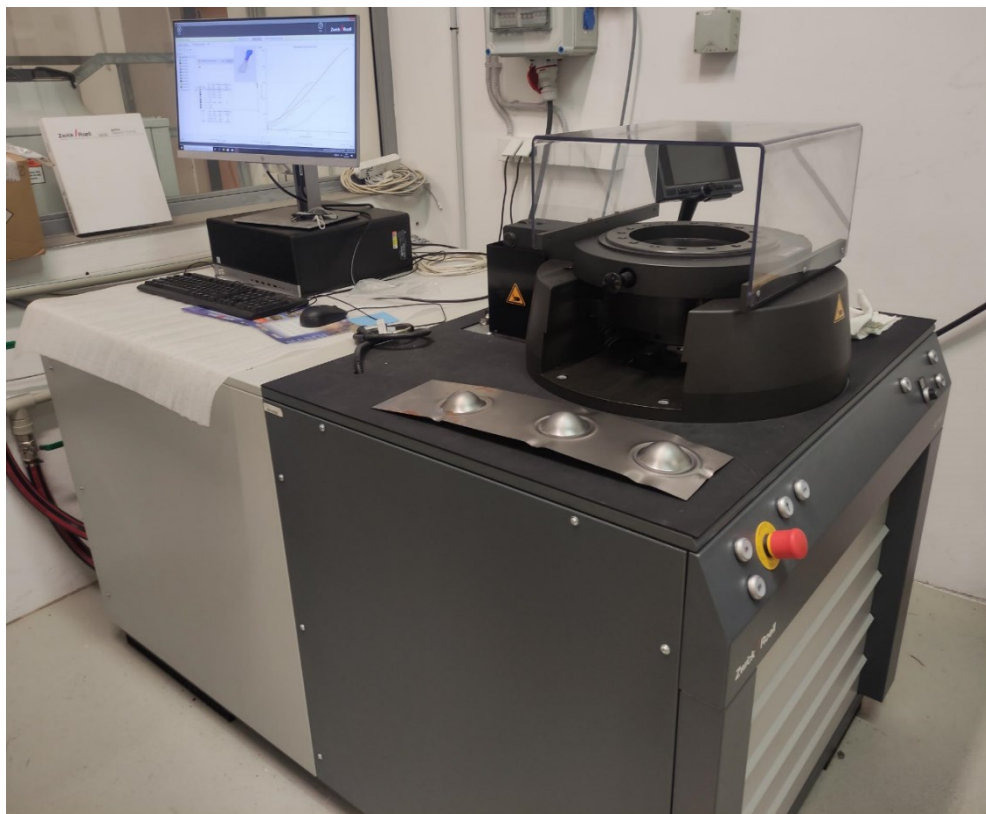
Hlavním cílem diplomové práce je hluboké tažení plechu s následným měřením mechanických vlastností, proto je nezbytné připravit výtažky, na kterých bude možné požadované hodnoty měřit. Přístřihem pro proces hlubokého tažení je plech 150 x 600 mm z předchozí kapitoly 8.6.1.

Pro hluboké tažení bylo vybráno dostupné zařízení BUP-600 od společnosti Zwick. Zařízení je určeno pro provádění zkoušek plechů a lze posuzovat tažnost plechů, vliv povrchových úprav, nátěrů nebo maziv na chování plechů během tváření (především zkoušky kalíškovací nebo ouškovací). BUP-600 umožňuje kontrolu efektivity tažného nástroje při procesu tažení a vliv jednotlivých parametrů procesu. Základní parametry zařízení BUP-600 znázorňuje Tab. 6.

Tab. 6 – Parametry zařízení BUP-600 [68]

Maximální zatížení [kN]	600
Maximální průměr přístřihu [mm]	250
Maximální šířka pásu přístřihu [mm]	260
Maximální tloušťka plechu [mm]	10
Maximální zdvih tažníku [mm]	120
Tažná rychlost [mm/min]	1000
Chladicí kapalina	voda

Zkušební zařízení BUP-600 je tvořeno zakrytovanou částí, ve které je uložena veškerá mechanika a elektronika pracovního zařízení. Hlavní pracovní část zařízení se skládá z tažnice a bezpečnostního krytu. Tažník se pohybuje směrem zespodu nahoru a provádí tažení plechu. Pro zpracování dat je k zařízení BUP připojen počítač.



Obr. 88 – Zařízení BUP-600 pro zkoušku tažení plechu

Pro diplomovou práci byly zvoleny 3 druhy zkoušek plechových dílů. Dvě zkoušky se řídí podle metody Erichsena a liší se průměry tažníků a tažnice. Menší průměr tažníku má hodnotu 20 mm a větší průměr tažníku s hodnotou 28 mm. Další zvolenou metodou je metoda LDH s využitím brzdných elementů. U této metody se definuje tažník o průměru 70,2 mm. Erichsenovu metodu lze využít pro plechy do tloušťky 2 mm, proto není aplikována pro plech tloušťky 3 mm. Plechy tloušťky 1 mm a 1,5 mm byly pomocí Erichsenovy metody testovány. LDH metoda s brzdou drážkou byla aplikována pro všechny tloušťky plechů. Jednotlivé aplikace metod shrnuje Tab. 7.

Tab. 7 – Využití testovacích metod hlubokého tažení

Plech	tloušťka plechu [mm]	Testovací metoda		
		Erichsen 20 mm	Erichsen 28 mm	LDH 70,2 mm
1.4376	1,0	ano	ano	ano
1.4376	1,5	ano	ano	ano
1.4376	3,0	-	-	ano

Provedení zkoušek plechů na BUP-600 bylo provedeno pro každý plech vícekrát pro nastavení vhodných podmínek a získání použitelných výtažků. Zleva na Obr. 89 je plech tloušťky 3 mm, následuje 1,5 mm a pak 1 mm. U metody LDH lze pozorovat patrné porušení v horní části výtažku, což demonstrovala simulace procesu v programu AutoForm R8. Se snižující se tloušťkou plechu je patrné vyšší protlačení brzdících elementů.



Obr. 89 – výtažky plechů materiálu 1.4376 pro jednotlivé tloušťky plechů

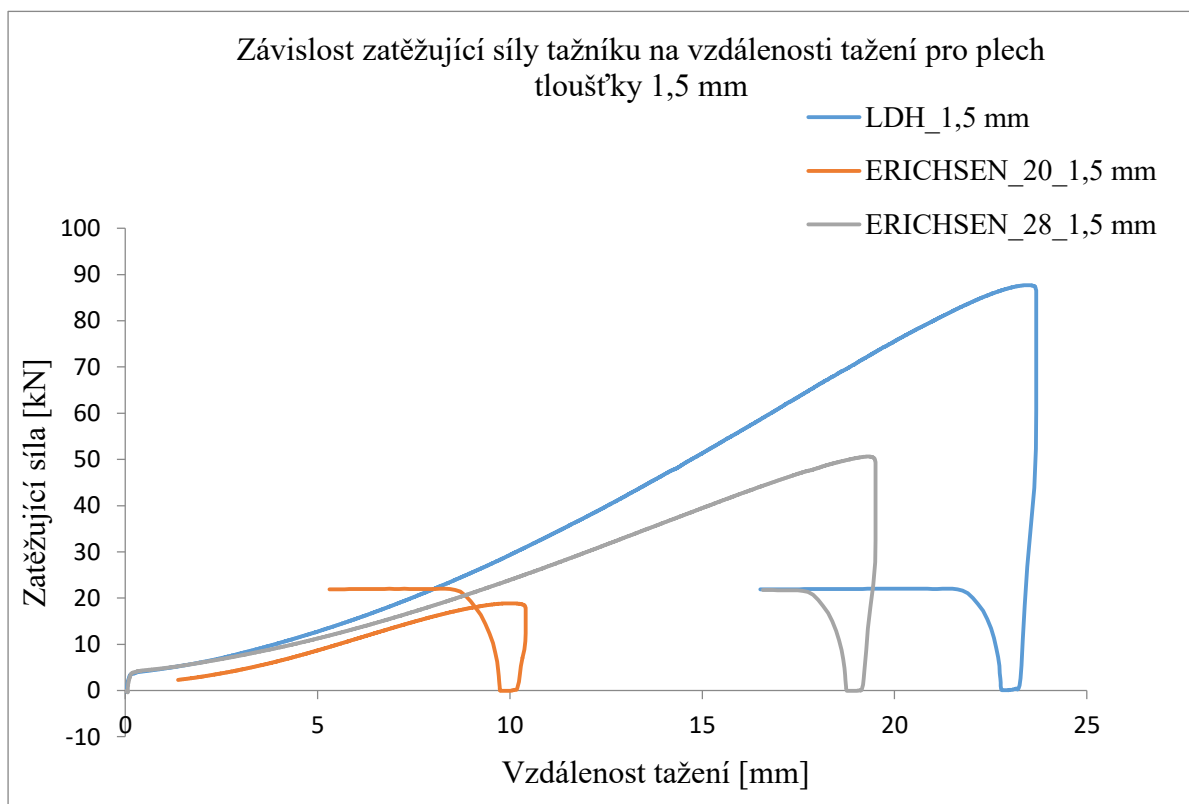
Pro jednotlivé tloušťky plechů se na BUP-600 provedly zkoušky, které byly zaznamenány v programu PC. Pro každý plech byl vyhodnocen parametr maximální síly F_{max} , maximální síla porušení F_{break} , dráha tažení do porušení $Travel_{break}$. Lze vyhodnotit i průměrnou rychlost tvorby výtažku. Pro názornou ukázkou byl porovnán plech tloušťky 1,5 mm pro všechny druhy zkoušek. Při použití odlišných metod zkoušek pro stejný materiál byly zjištěny velmi rozdílné výsledky. Porovnání znázorňuje Tab. 8.

Tab. 8 – Porovnání získaných parametrů zkoušek pro plechy tloušťky 1,5 mm

TLOUŠŤKA PLECHU 1,5 mm			
	FLD	ERICHSEN - 20 mm	EICHSEN - 28 mm
F_{max} [kN]	87,707	22,027	50,616
F_{break} [kN]	87,457	18,501	50,342
$Travel_{Break}$ [mm]	23,640	10,363	19,459

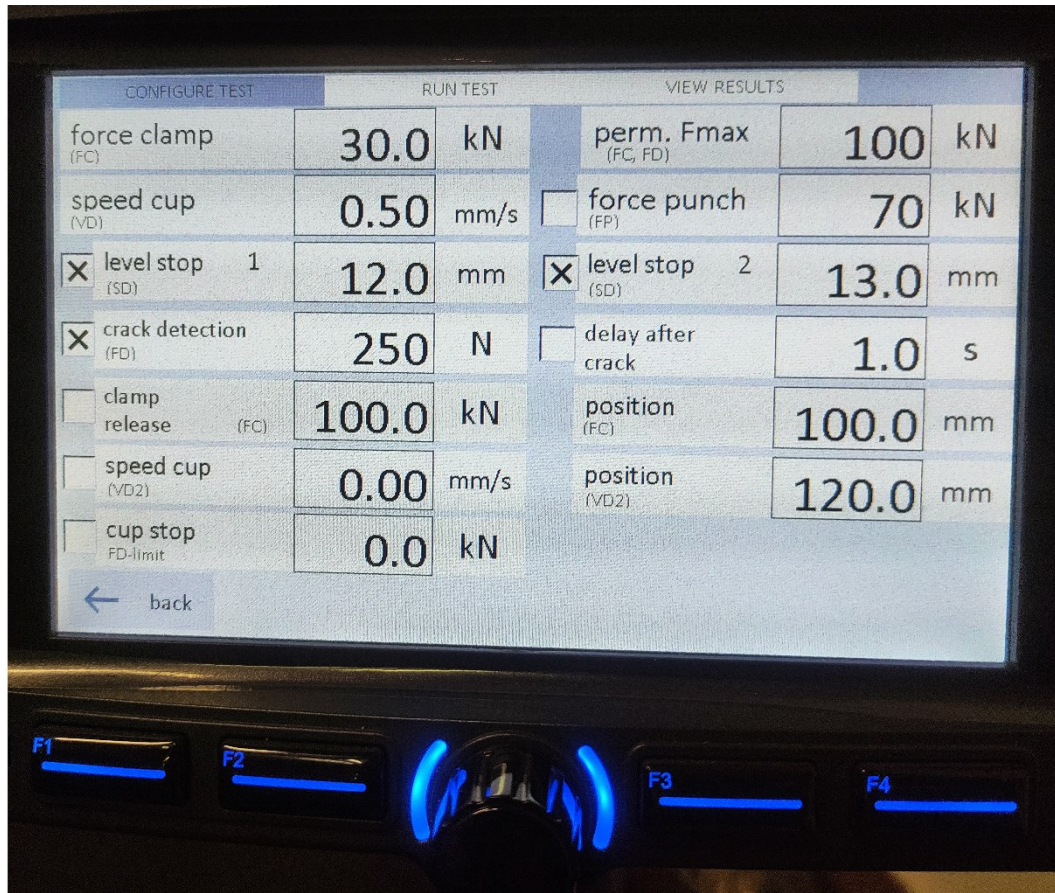
Podle Tab. 8 byly získány nejlepší výsledky pro plech testovaný zkouškou LDH s brzdící drážkou. Maximální hodnota tažení byla 23,64 mm, kde došlo k porušení výtažku. Následující zkouškou podle Erichsena (s využitím tažníku o průměru 28 mm) se naměřila maximální hodnota síly 50,616 kN. Velikost výtažku při porušení klesla na hodnotu 19,459 mm. Nejnižší hodnoty tažení vykazuje plech tloušťky 1,5 mm pro Erichsenovu metodu s tažníkem 20 mm. Tažná dráha byla naměřena 10,363 mm při zatěžující síle 18,501 kN. Zjištěné hodnoty sil a tažných vzdáleností jsou dány geometrií tažníku a tažnice. Při použití menšího tažníku není možné dosáhnout stejné vzdálenosti tažení jako v případě velkého tažníku pro metodu LDH. Odlišné podmínky procesu tažení způsobují změnu jednotlivých parametrů, a proto je nutné správně navrhnout celý proces tažení pro výrobu dílů bez defektů.

Výstupem zkoušky plechů ze zařízení BUP-600 jsou data zatěžující síly a vzdálenosti tažení. Vykreslení dat zobrazují průběhy na Obr. 90. Při zkoušení dochází k tažení plechu a postupnému zvyšování síly. Při maximálním možném zatížení plechu dochází k jeho porušení a k poklesu zatěžující síly na nulovou hodnotu. Jednotlivé průběhy jsou navzájem podobné, ale liší se velikostí zatěžující síly a vzdáleností tažení.



Obr. 90 – Závislost zatěžující síly tažníku na vzdálenosti tažení pro plech tloušťky 1,5 mm

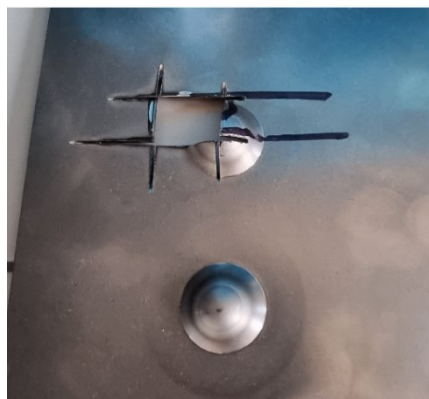
Nastavené parametry tažení pro zařízení BUP-600 zobrazuje Obr. 91. V systému zařízení se definuje síla přidržovače (force clamp – 30 kN), rychlost tažení (speed cup - 0,50 mm/s), maximální síla F_{max} (100 kN), síla tažníku (force punch – 70 kN). Dále lze definovat maximální hodnoty tažení výtažku (level stop) a detekci trhlin s nastavením prodlevy detekce. Uvolnění síly tažníku souvisí s nastavením parametru clamp release (100 kN).



Obr. 91 – Nastavené parametry zařízení BUP-600

8.6.3 Příprava preparátů plechu a návrh oblastí pro měření

Po provedení procesu hlubokého tažení plechů následuje preparace požadovaných částí. Výtažek pro každou metodu je nutné nařezat, aby bylo možné provést zapouzdření do pryskyřice. Pomocí fixy se na pásech plechů vyznačily čáry, pomocí kterých se řídí řez na pile. Vyřezaný kus se následně upravil pomocí laboratorní přímočaré pily. Provedený řez znázorňuje Obr. 92.



Obr. 92 – Preparace výtažků plechu

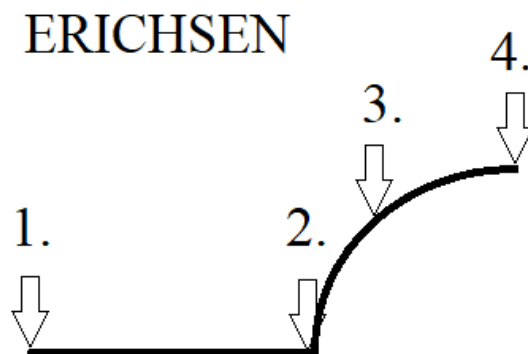
Na rozřezání částí výtažků byla využita laboratorní lineární přesná pila IsoMet 4000 od společnosti Buehler, využívající diamantový brusný kotouč. Pro chlazení se využívá rezná kapalina přiváděná do místa řezu kotouče. Otáčky pily byly nastaveny na 1800 ot./min.



Obr. 93 – Lineární přesná pila IsoMet 4000

Rozřezání výtažků bylo navrženo tak, aby bylo možné popsat jednotlivé oblasti tažení, ve kterých dochází ke změně mechanických vlastností. Posuzovány budou u metody podle Erichsen 4 oblasti plechu:

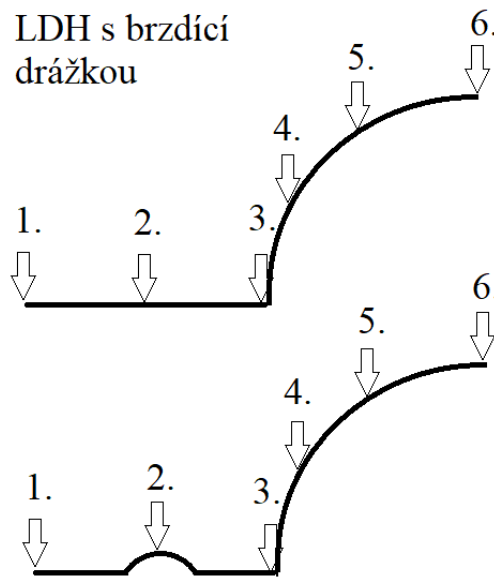
- Oblast první změny mechanických vlastností (1),
- Oblast počátku tažení výtažku (2),
- Oblast průběhu tažení (3),
- Oblast vrcholu výtažku (4).



Obr. 94 – Příprava vzorku s uvážením měřených míst (ERICHSEN)

Pro metodu LDH bude posuzováno 6 oblastí vzhledem k větší ploše výtažku a kvůli využití brzdících elementů. Preparát bude rozdělen na:

- Oblast první změny mechanických vlastností (1),
- Oblast použití brzdícího elementu (2),
- Oblast počátku tažení výtažku (3),
- Oblast průběhu tažení (4),
- Oblast průběhu tažení (5),
- Oblast vrcholu výtažku (6).



Obr. 95 - Příprava vzorku s uvážením měřených míst (LDH)

Znázornění provedených řezů pro přípravu preparátů u všech zkoušených plechů materiálu 1.4376 znázorňuje Obr. 96.

8.6.4 Zapouzdření preparátů plechů

Samostatný preparát výtažku není možné měřit, protože jej nelze upnout tak, aby bylo možné změřit požadované mechanické vlastnosti. Samotný přístroj pro měření tvrdosti je schopen s vysokou přesností změřit požadované hodnoty, avšak pokud není měřený vzorek správně upnut, dochází ke značnému zkreslení výsledků, které nelze následně použít. S výhodou se provede zapouzdření preparovaných částí výtažků do prskyřice, která je ve formě prášku.



Obr. 96 – Znázornění řezů pro přípravu preparátů plechů

Zkoumané preparáty plechů byly pomocí automatického lisu SimpliMet 1000 od společnosti Buehler zalisovány. Automatický lis SimpliMet 1000 se využívá pro výrobu termosetových a termoplastických vzorků. Nastaven byl čas ohřevu (1:30 min), čas chlazení (4 min) a lisovací tlak (290 barů). Dále se nastavil průměr vzorku, který je pro zvolené zařízení 40 mm a lisovací teplota 150 °C. Jako prášek byla použita pryskyřice PhenoCure od stejné společnosti Buehler.



Obr. 97 – Automatický lis SimpliMet 1000 s práškovou pryskyřicí PhenoCure

Po definování parametrů se posunul píst lisu do horní polohy a na něj se umístily preparáty plechu. Poté se pístem sjelo do nejnižší polohy a nasypala se prášková pryskyřice po okraj lisovací komory. Lisovací komora se uzavřela a proběhl proces lisování pro nastavené podmínky. Stejný postup byl aplikován pro všechny připravované vzorky. Do každého vzorku byly vloženy všechny oblasti preparovaného plechu pro každou tloušťku plechu. Způsob umístění a rozdělení preparátů je znázorněn na Obr. 98 pro již vybroušené vzorky. Zleva jsou plechy zkoušené metodou LDH pro tloušťky 3 mm, 1,5 mm a 1 mm. Uprostřed plechy zkoušené metodou dle Erichsena pro tažník 28 mm (vlevo tloušťka 1 mm a vpravo 1,5 mm). Vzorek vpravo obsahuje společně plech zkoušený dle Erichsena s tažníkem o průměru 20 mm (vlevo plech tloušťky 1,5 mm, vpravo tloušťky 1 mm).



Obr. 98 – Vybroušené vzorky obsahující preparáty plechů

Vzorky pro plech tloušťky 3 mm byly rozřezány vzhledem k velikosti na jednotlivé úseky. Ve vzorku je zalisována část ovlivněného plechu a místa využití brzdícího elementu (Obr. 95 pro pozice 1. a 2.). Na druhém preparátu bude posuzována počáteční oblast tažení a část výtažku kopule (Obr. 95 pro pozice 3. a 4.). Pro třetí preparát se posuzují zbylé oblasti 5. a 6. z Obr. 95. U vzorků tažených podle metody Erichsen byla vložena celá posuzovaná geometrie.

Po provedení kroku zapouzdření je získán válec černé barvy o průměru 40 mm a výšce 20 mm s vystupujícími preparáty plechu. Výška preparovaného plechu byla přibližně 15 mm.

8.6.5 Broušení vzorků

Zapouzdřený vzorek se následně vybrousí, aby bylo možné přejít k měření požadovaných vlastností preparovaných částí plechů. Broušení probíhá pomocí zařízení s rotující hlavou, do které lze upnout jednotlivé vzorky, a rotujícím stolem s brusným kotoučem. Vzájemným pohybem mezi rotující hlavou a brusným kotoučem dochází k broušení povrchu vzorku.

Pro broušení vzorků bylo použito zařízení EcoMet 250 Pro s rotující hlavou AutoMet 250. Obě zařízení jsou vyrobena společností Buehler. Na zařízení se nastavily otáčky rotace hlavy (40 ot./min) a stolu (100 ot./min), dále přitlačná síla (20 N), kterou jsou vzorky přitlačeny k brusnému kotouči. Pro zlepšení chladícího účinku a odplavování třísky je do místa broušení dopravována voda. Broušení se provedlo ve více krocích s brusnými kotouči o různé zrnitosti (P180, P320, P600 a nakonec P1200). K doleštění vzorků byla použita diamantová suspenze s velikostí částic 9 μm a 3 μm . Doleštění se provádí bez přívodu chlazení.



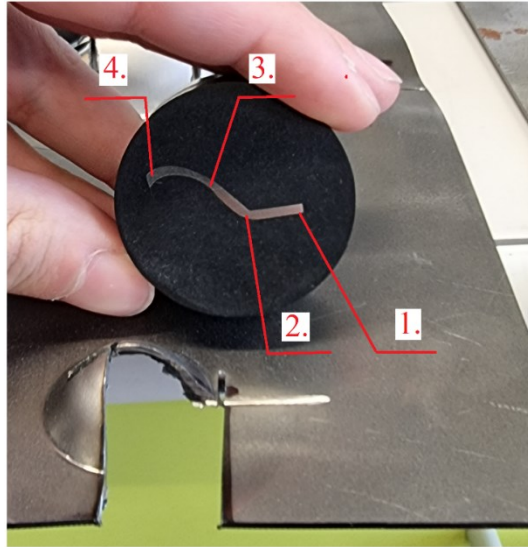
Obr. 99 – Zařízení na broušení metalografických vzorků (EcoMet 250 Pro)

8.7 Měření mechanických vlastností

Výstupem praktické části je posouzení mechanických vlastností ve vztahu k procesu hlubokého tažení. Jednotlivé způsoby tažení budou ovlivňovat mechanické vlastnosti stejně jako volba samotného materiálu a jeho tloušťky. Na zhotovených vzorcích se vybrané vlastnosti měřily a následně vyhodnotily.

8.7.1 Měřená místa – Erichsenova metoda

Pro obě metody podle Erichsena budou posuzovány 4 oblasti. U vybraných oblastí předpokládáme vzhledem k mechanismu hlubokého tažení největší změny, což je hlavním cílem měření mechanických vlastností vybraného plechu 1.4376.



Obr. 100 – Měřené oblasti pro zkoušku hlubokotažnosti podle Erichsena

Obr. 100 znázorňuje polohu vzorku vzhledem k plechu, který byl tvářen pomocí hlubokého tažení. Číselný popis oblastí se shoduje s původním teoretickým návrhem:

- Oblast první změny mechanických vlastností (1.),
- Oblast počátku hlubokého tažení (2.),
- Oblast průběhu hlubokého tažení (3.),
- Oblast vrcholu výtažku (4.).

8.7.2 Měřená místa – LDH metoda

V případě metody LDH s brzdící drážkou se způsob měření shoduje s teoretickým návrhem a jednotlivé oblasti jsou popsány na Obr. 101. Jedná se o:

- Oblast první změny mechanických vlastností (1),
- Oblast použití brzdícího elementu (2),
- Oblast počátku tažení výtažku (3),
- Oblast průběhu tažení (4),
- Oblast průběhu tažení (5),
- Oblast vrcholu výtažku (6).

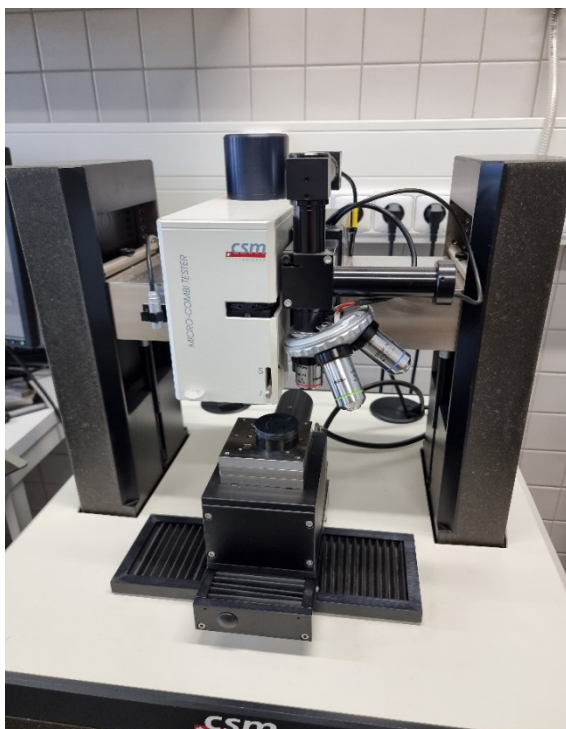


Obr. 101 - Měřené oblasti pro zkoušku hluboko-tažnosti LDH

8.7.3 Měřicí zařízení – Mikro-kombi tester MCT³

Pro zkoušku instrumentované zkoušky tvrdosti se využívá mikro-kombinovaný tester MCT³ od společnosti CSM instruments, který je univerzálním měřicím strojem pro úplnou charakterizaci objemových těles (kovů a polymerů) a dále slouží pro měření tvrdých povlaků nebo tepelných/plazmových nástřiků.

Zařízení umožňuje měření tvrdosti a modulu pružnosti, tečení, stanovení práce plastických a elastických složek vnikacího procesu pomocí instrumentované indentace DSI. Dále lze měřit přilnavost povlaků nebo odolnost proti poškrábání. Výše popsané mechanické vlastnosti byly zmíněny z důvodu jejich měření v praktické části diplomové práce. Výrobce zařízení dodává k měřicímu zařízení software, pomocí kterého jsou jednotlivá data vykreslena a zaznamenána pro další zpracování.



Obr. 102 – Mikro-kombinovaný tester MCT³

Součástí měřicího přístroje je upínací stůl a konstrukce s dostatečnou tuhostí. Indentačním tělesem je Vickersův čtyřboký diamantový jehlan s vrcholovým úhlem 136°.

Obr. 103 obsahuje základní technické specifikace měřicího zařízení MCT³. Přístroj umožňuje provádět indentaci od malých hloubek (v řádech nm k detekci povrchu) po velké hloubky (maximum 1 mm). Rozsah aplikované a měřené síly od 10 mN do 30 N. [69]

Technické specifikace	
Maximální zatížení [N]	30
Rozlišitelnost zatížení [μ N]	6
Rozsah hloubky [μ m]	1000
Rozlišitelnost hloubky [nm]	0,03
Rychlost škrábání [mm/min]	0,1 až 600
Možnosti	
Peltierův ohřev až na 120°C	ano
Ohřev až do 200°C	ano
Ochlazení až na -120°C	ano
Testování kapalin	ano

Obr. 103 – Technické specifikace mikro-kombinovaného testeru MCT³ [69]

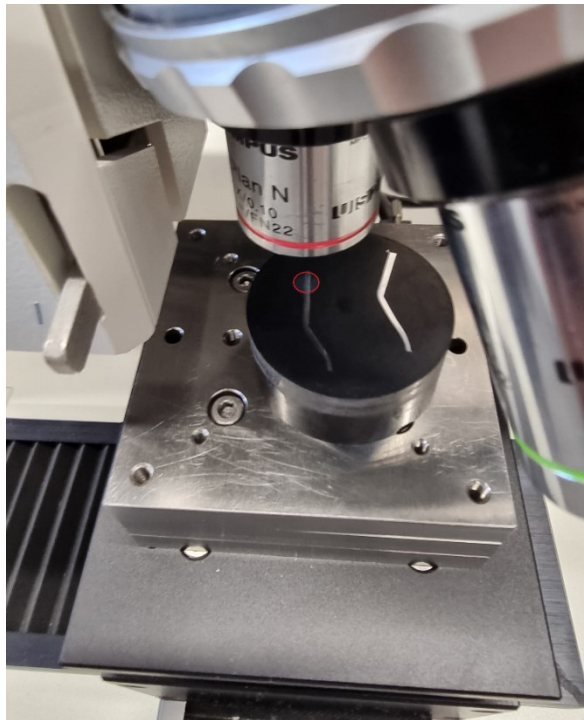
8.7.4 Postup měření

Měření se nastavuje v prostředí programu od společnosti CSM, který je dodáván spolu s měřicím zařízením MCT³.

Nastavení procesu měření lze shrnout do tří základních kroků, které je nutné provést. Jedná se o nastavení místa indentace pomocí mikroskopu, zjištění výšky povrchu a následné nastavení parametrů měření jako jsou zatížení, odtěžující rychlost s prodlevou, kroky mezi indentacemi a zvolený typ měřící matice. Po nastavení kroků se provede automaticky měření požadované oblasti dle zvolené matice. Samotné měření trvá přibližně 1,5 h pro každou oblast. Najetí bodů respektuje zvolený způsob měření dle kapitoly 8.7.1 Měřená místa – Erichsenova metoda a dle kapitoly 8.7.2 Měřená místa – LDH metoda. Způsob nastavení se shoduje pro všechna místa jednotlivých vzorků plechů.

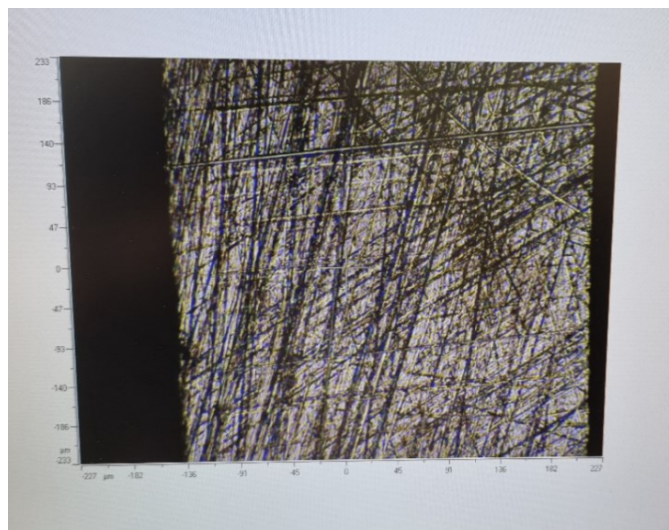
Prvním krokem se nastavuje pozice vzorku pod mikroskopem. Zařízení má pohyblivý stůl v ose XY a pomocí programu lze měnit jeho pozici. Výška vzorku v ose Z se nastavila do těsné blízkosti vzorku a indentační hlavy. Pro lepší orientaci polohy na měřeném vzorku je mikroskop vybaven osvětlujícím bodem, který ukazuje místo, kde se nachází aktuální pozice měřeného bodu. Pozice měření se pro každé měření upravuje dle zvolené strategie měřených míst. Po nalezení bodu označeného světlem lze vypnout mikroskopový záznam

v prostředí programu. Obr. 104 zobrazuje nalezení měřeného místa pomocí osvětleného kruhu (pro lepší názornost byl kruh světla označen červenou barvou). Měřené místo charakterizuje plech 1.4376 tloušťky 1 mm pro Erichsenovu metodu s tažníkem o průměru 20 mm v oblasti minimální změny mechanických vlastností.



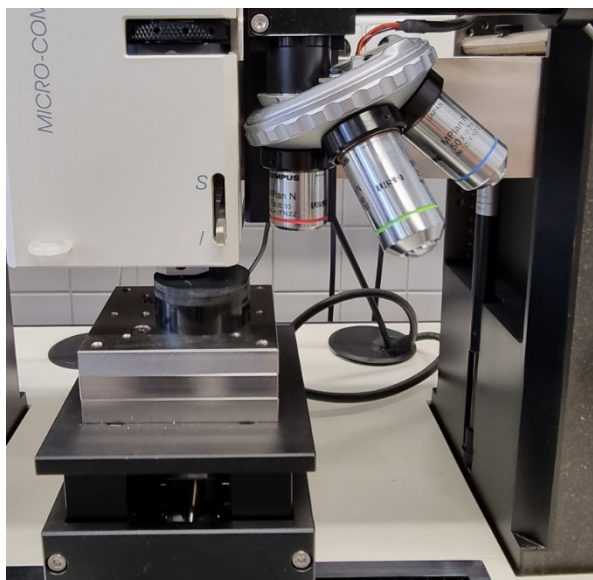
Obr. 104 - Nalezení měřeného místa pod mikroskopem (E20TL1)

Výše zmíněná pozice měření, která je osvětlena pomocí světelného kruhu, se v prostředí programu měřicího zařízení vykresluje video-záznamem mikroskopu (lze zaostřovat).



Obr. 105 – Snímek mikroskopu v prostředí programu CSM (E20TL1)

Po umístění vzorku na měřicí stůl a nastavení polohy vzorku se v programu CSM definuje funkce zjištění výšky povrchu (adjust depth offset). Indentace se provede při zatížení 0,01 N. Po potvrzení stůl se vzorkem automaticky přejede pod indentační hlavu a dojde k indentaci povrchu. Pro další měření bude zařízení respektovat nastavenou matici k proměření požadovaných počtů bodů.



Obr. 106 – Zjištění výšky povrchu automatickou indentací pro zatížení 0,01 N.

V dalším kroku se posune stůl v ose Y o hodnotu 100 μm . Důvodem posunutí měřicího stolu je zamezení měření ve stejném místě vzorku, ve kterém byla provedena indentace pro zjištění výšky povrchu. Pokud by se měřilo ve stejném místě, došlo by ke zkreslení výsledků mechanických vlastností. Posledním krokem je definování parametrů indentace. Matice byla zvolena jednoduchá (simple matrix). Dále se definovalo zatížení, odtěžující rychlost, prodleva, krok mezi indentacemi a hodnoty matice vyjadřující počet měření. Nastavené parametry systému zobrazuje Tab. 9. Hodnota matice X a Y vyjadřuje celkový počet měření (hodnota 10). Nastavené parametry indentace se shodují pro všechna měření. Měření jedné oblasti (10 hodnot) zabere přibližně 1,5 h.

Tab. 9 – Nastavení parametrů indentace

Zatížení [N]	1
Zatěžující/odtěžující rychlost [N/min]	2
Prodleva po indentaci - pauza [s]	12
krok mezi indentacemi [μm]	200
Hodnota matice X [-]	-2
Hodnota matice Y [-]	5

9 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Veškerá naměřená data byla z programu CSM exportována do prostředí Microsoft Excel. Jednotlivé naměřené výsledky mechanických vlastností byly zpracovány pomocí grafů, které umožňují snadnou interpretaci výsledků. V popisu grafů je vždy uvedena legenda, která uvažuje zvolenou metodu zkoušení plechu a tloušťku plechu. Graf je dán závislostí měřené mechanické veličiny na posuzovaných oblastech.

9.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

9.1.1 LDH metoda

První vyhodnocovanou mechanickou vlastností je vtisková tvrdost H_{IT} . Tvrdost charakterizuje odpor materiálu proti vnikání indentačního tělesa. Zkušební metoda tažení LDH byla provedena pro všechny tloušťky plechu. Graf na Obr. 107 znázorňuje výraznou změnu vtiskové tvrdosti pro jednotlivé tloušťky plechu při zachování stejných podmínek procesu tažení.

Pozice 1 označuje místo před brzdícím elementem, kde nedochází k výrazné změně mechanických vlastností plechů vlivem tažení. Na vtiskovou tvrdost má vliv proces výroby plechu a evidentně i samotná tloušťka plechu. V oblasti brzdícího elementu dochází ke zvýšení vtiskové tvrdosti H_{IT} u plechů s menší tloušťkou. U plechu tloušťky 3 mm došlo k mírnému poklesu vtiskové tvrdosti. Tvrdost se v oblasti brzdy shoduje nezávisle na tloušťce plechu.

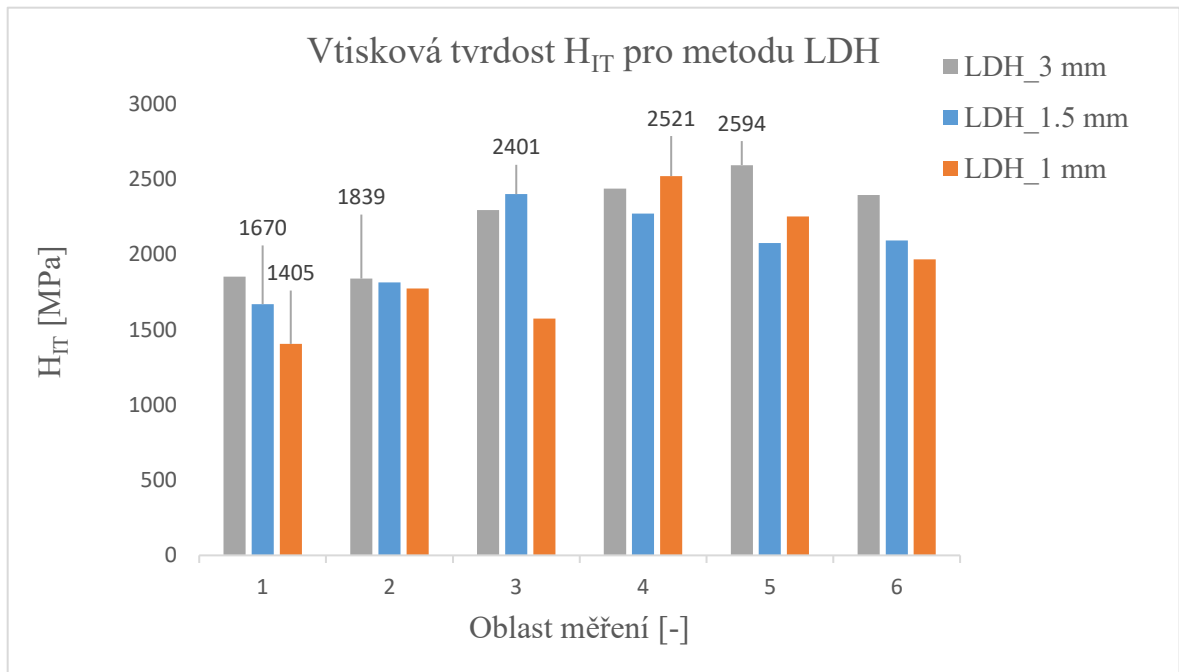
Oblast 3 znázorňuje počátek tažení kopule a také oblast za brzdícím elementem. Pro plech tloušťky 1 mm dochází k poklesu tvrdosti vlivem tažení plechu. Pro větší tloušťky se v této oblasti tvrdost značně zvýšila. U plechu 1,5 mm bylo zvýšení tvrdosti největší vzhledem ke všem měřeným oblastem. Podle výsledku měření (pro plech tloušťky 1,5 mm) by bylo možné uvažovat oblast za brzdícím elementem jako nejnebezpečnější.

Oblast 4 popisuje průběh tažení kopule a poukazuje na nejvyšší nárůst tvrdosti pro plech tloušťky 1 mm. Dle simulace se jedná o nebezpečnou oblast, ve které dojde nejčastěji k praskání výtažku. Pro plech tloušťky 3 mm dochází k dalšímu zvýšení tvrdosti, které dosáhne maxima v oblasti 5, která stále spadá do nebezpečné oblasti simulace.

Zkoumaná oblast vrcholku výtažku, označená pozicí 6, vykresluje snižování hodnoty vtiskové tvrdosti oproti předchozí posuzované oblasti vzhledem k jednotlivým tloušťkám

plechů. Vyhodnocení naměřených hodnot odpovídá nebezpečným oblastem simulace a je nutné dbát na správný výběr materiálu, zvolenou tloušťku plechu i podmínky procesu hlubokého tažení.

Nejvyšší změna vtiskové tvrdosti nastává u plechu tloušťky 1 mm. Pro nastavený proces tažení by bylo použití plechu nejméně vhodné vzhledem k očekávanému vzniku porušení.



Obr. 107 – Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu LDH

9.1.2 Erichsenova metoda – 28 mm

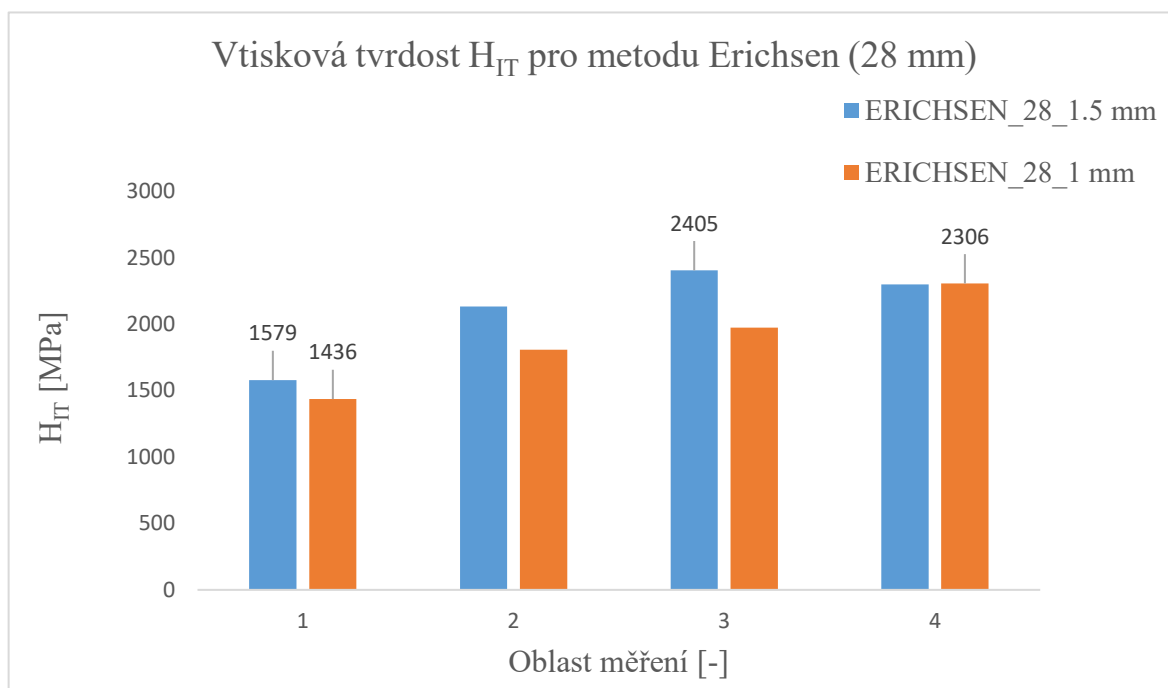
Vyhodnocení vtiskové tvrdosti H_{IT} pro Erichsenovu metodu s tažníkem o průměru 28 mm posuzuje pouze 4 oblasti plechu. Vyhodnocení se uvažuje pro plechy tloušťky 1 mm a 1,5 mm. Graf na Obr. 108 obsahuje maximální a minimální hodnoty vtiskové tvrdosti.

Oblast 1 pro plech tloušťky 1 mm vykazuje podobnou tvrdost jako v případě využití metody LDH. Změna hodnoty H_{IT} může být ovlivněna absencí brzdících elementů, čímž dochází k tažení plechu i v oblasti 1. Při zvýšení tloušťky plechu se pro větší průměr tažníku zvýší hodnota tvrdosti vlivem tažení plechu z oblasti 1.

Vtisková tvrdost (u plechu tloušťky 1 mm) během procesu tažení narůstá a je nejvyšší na vrcholu výtazku. Pro vyšší tloušťku plechu se nejvyšší hodnota vyskytuje v průběhu tažení kopule (oblast 3). Tato oblast spadá dle simulace do nebezpečné oblasti.

Oblast 4, popisující vrchol výtažku, zjišťuje podobnou hodnotu vtiskové tvrdosti pro obě tloušťky plechu 1.4376.

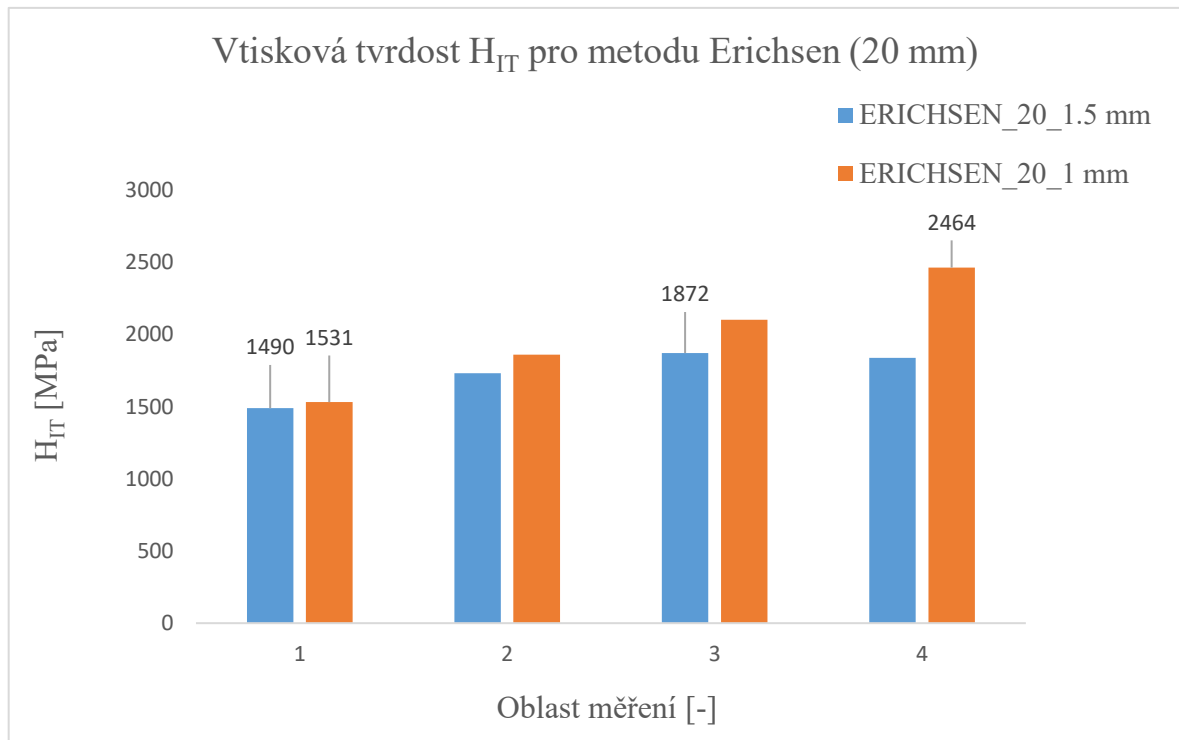
Pro odlišnou metodu zkoušení se liší vtisková tvrdost v posuzované oblasti 1. Odlišné podmínky tažného nástroje a absence brzd poukazují u vyšší tloušťky plechu na menší nárůst vtiskové tvrdosti v oblasti 1. V průběhu tažení kopule (oblast 3) se hodnoty tvrdosti přibližují k hodnotám zkušební metody LDH. Výsledky na vrcholku výtažku se odlišují vlivem jiné geometrie tažníků. Odlišné nástroje při tažení však opět poukazují na zásadní změny mechanických vlastností plechů.



Obr. 108 – Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu podle Erichsen (tažník 28 mm)

9.1.3 Erichsenova metoda – 20 mm

Oblast 1 vykazuje obrácené výsledky při použití tažníku s menším průměrem. Menší průměr způsobil u plechu o tloušťce 1 mm nárůst tvrdosti vlivem účinku tažení, zatímco u plechu s větší tloušťkou došlo ke snížení vtiskové tvrdosti. Větší tloušťka plechu zároveň poukazuje na nižší zvýšení vtiskové tvrdosti. V případě plechu tloušťky 1 mm se vtisková tvrdost zvyšuje směrem k vrcholu výtažku podobně jako při použití většího průměru tažníku. Tento fakt potvrzuje simulace, která poukazuje u procesu s menším průměrem tažníku na nebezpečnou oblast na vrcholku výtažku. Hodnota vtiskové tvrdosti se zvýšila oproti použití tažníku o průměru 28 mm.



Obr. 109 - Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu podle Erichsen (tažník 20 mm)

9.2 Mikro-tvrdost dle Vickerse H_{VIT}

Pro měření dalších parametrů byla využita metoda Oliver-Pharr, která slouží pro měření mechanických vlastností z dat získaných v průběhu indentace. Data jsou zaznamenána jako závislost zatížení na hloubce indentace, a to během zatěžování i odlehčování indenteru.

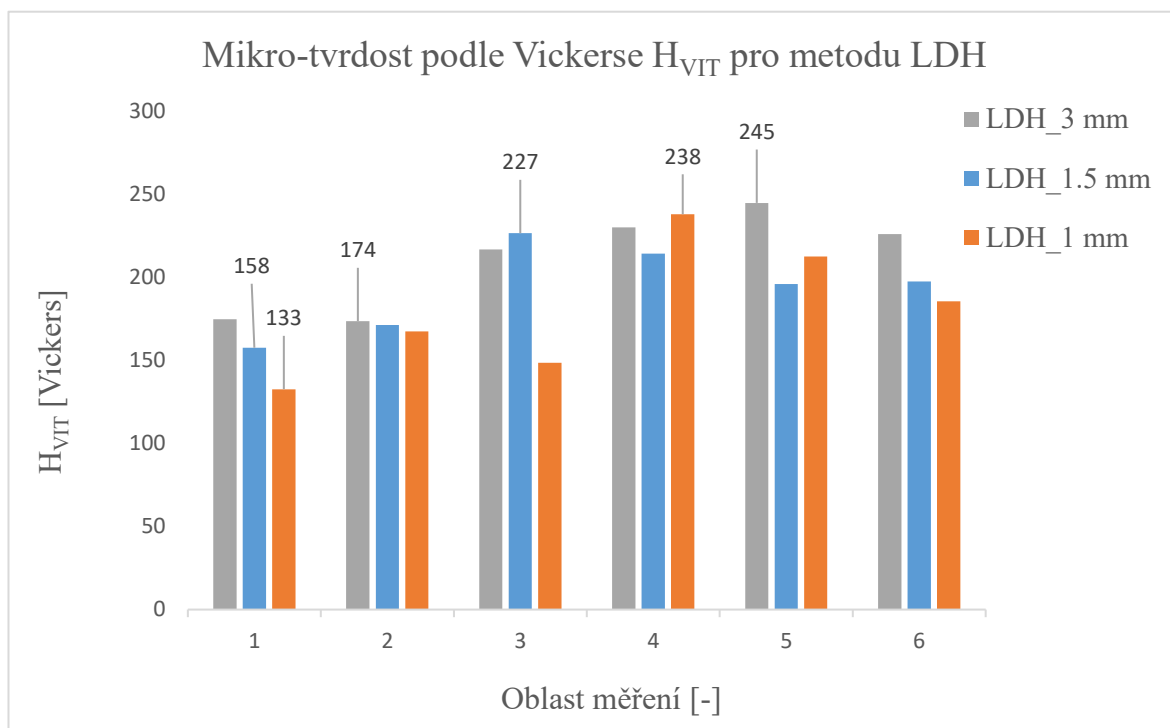
9.2.1 LDH metoda

Průběhy naměřených hodnot se u vtiskové tvrdosti H_{IT} a mikro tvrdosti podle Vickerse podobají. Oblast 1, popisující plech před brzdícím elementem, vykazuje nejnižší hodnoty mikro tvrdosti vzhledem k ostatním měřeným místům výtažků. V místě umístění brzdy dochází k mírnému snížení mikro tvrdosti u plechu tloušťky 3 mm, zatímco ostatní plechy vykazují zvýšení tvrdosti. Hodnoty mikro-tvrdosti jsou pro všechny tloušťky v oblasti 2 podobné.

Nejvyšší hodnota mikro-tvrdosti se vyskytuje u plechu tloušťky 1,5 mm v oblasti 3 (stejně jako u vtiskové tvrdosti), dále v průběhu tažení mikro-tvrdost klesá. Maximální hodnota (plechu 1,5 mm) dosahuje hodnoty 227 Vickerse. V oblasti 3 bude opět očekávané porušení plechu při tažení.

Plech tloušťky 3 mm dosahuje maximální mikro-tvrdomosti v oblasti 5 (shodné se simulací). Nebezpečná oblast v simulaci tedy souvisí s místním zvýšením tvrdosti při tažení plechů. Nejvyšší hodnota mikro-tvrdomosti činila 245 Vickerse.

Mikro-tvrdomost (u nejtenčího plechu) vykazuje snížení v oblasti za brzdícím elementem (oblast 3), dále se při počátku tažení (oblast 4) zvýší vlivem tváření plechu. Simulace znázorňuje nejvyšší hodnotu porušení v této oblasti, což souhlasí s reálnými výsledky. V průběhu dalšího tažení tvrdost klesá.

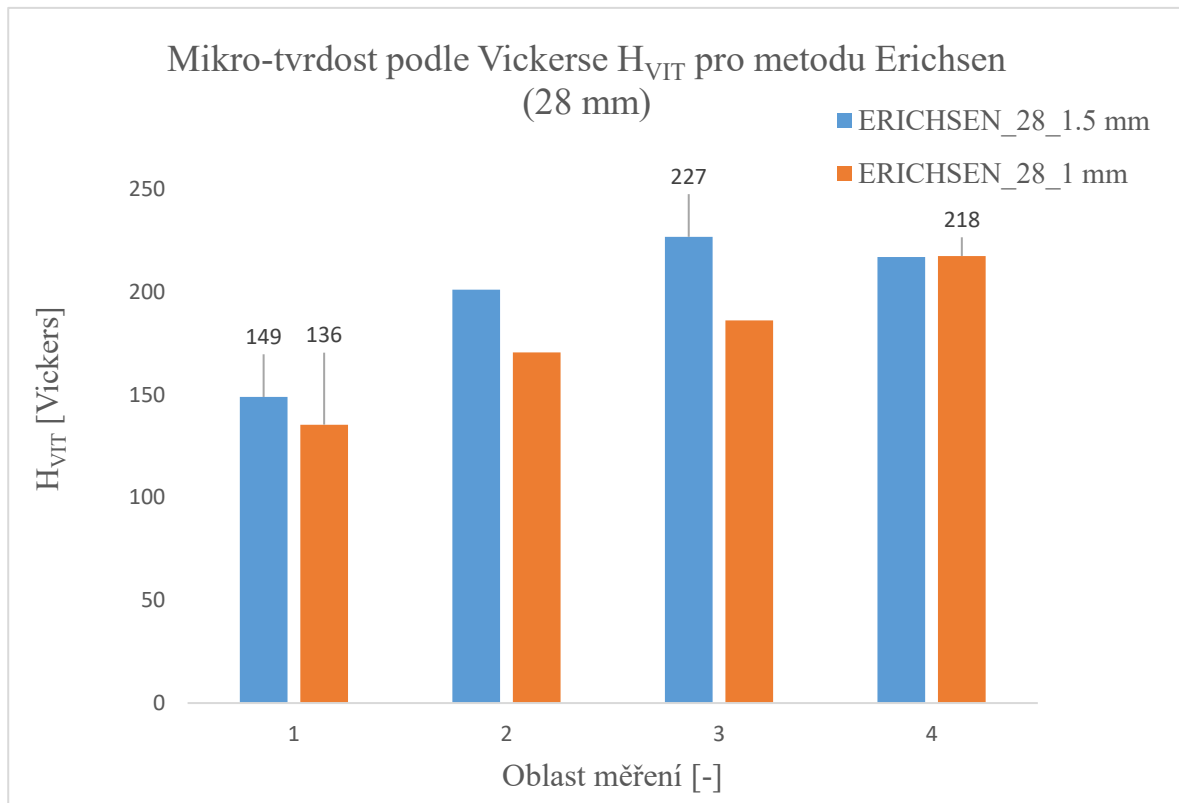


Obr. 110 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu LDH

9.2.2 Erichsenova metoda – 28 mm

Hodnoty mikro-tvrdomosti se v oblasti 1 blíží hodnotám tažení pomocí LDH metody. Brzdící elementy získanou tvrdost téměř neovlivňují. Při dalším vyhodnocování bylo zjištěno, že se mikro-tvrdomost zvyšuje. Nejvyšší hodnota (pro plech tloušťky 1 mm) je na vrcholu výtažku. Tento fakt potvrzuje i maximální porušení výtažku na vrcholu, které indikovala simulace maximálního porušení.

U tloušťky plechu 1,5 mm dosáhla mikro-tvrdomost maxima v bodu 3, který se nachází v průběhu tažení kopule. Zvýšení tvrdosti vede k porušení výtažku. Změnu vlastností způsobuje průběh tažení plechu spolu s geometrií vtlačovaného tažníku. Návrh tažníku, tvaru výtažku a podmínek tažení ovlivňuje mechanické vlastnosti výtažku. Vyhodnocené výsledky měření potvrzují proměnlivé výsledky pro jednotlivé zkušební metody plechů.

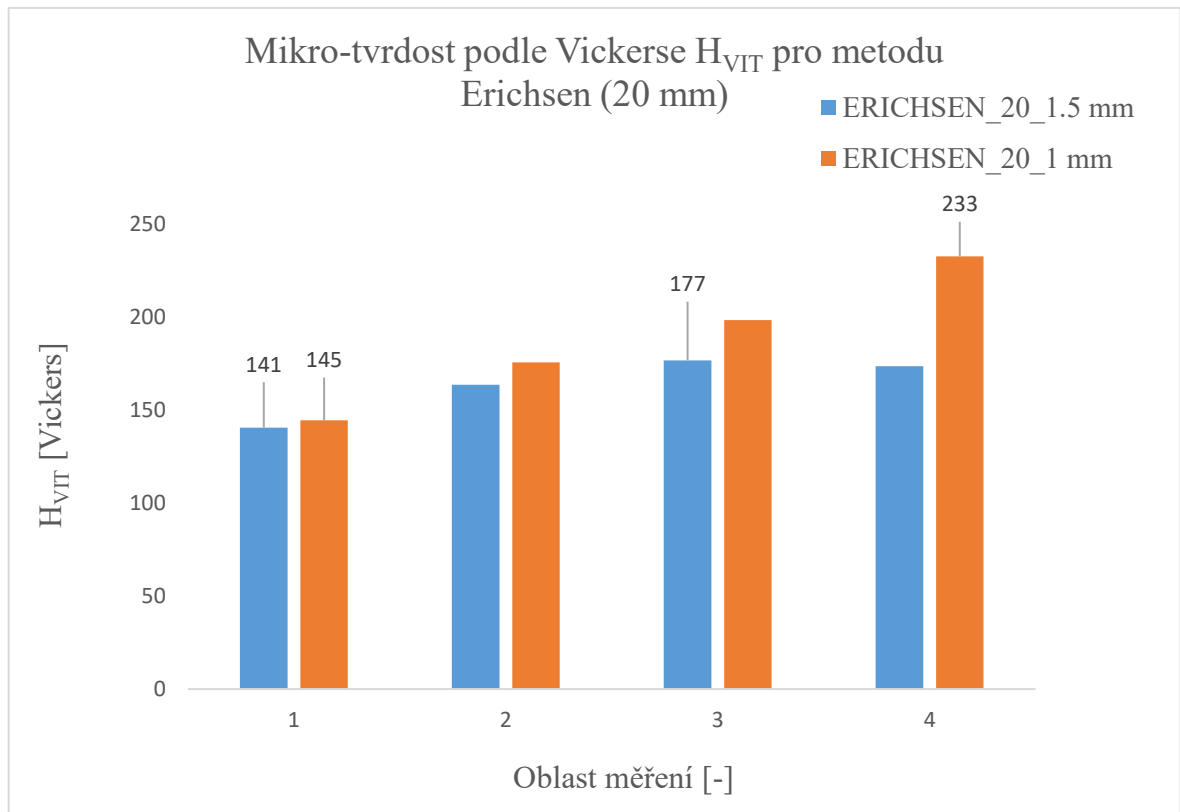


Obr. 111 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu Erichsen (28 mm)

9.2.3 Erichsenova metoda – 20 mm

První oblast (oblast 1) ukazuje snížení hodnoty mikro-tvrđosti u plechu 1,5 mm oproti Erichsenově metodě s tažníkem 28 mm. Plech tloušťky 1 mm vykazuje mírné zvýšení tvrdosti. Tyto fakty jsou dány využitím menšího průměru tažníku, který u tenčího plechu tváří materiál více než v případě většího tažníku, což se projevuje vyšší tvrdostí u tenčího plechu.

Při dalším vyhodnocování výsledků je zjištěn nárůst mikro-tvrđosti pro plech tloušťky 1 mm. Nejvyšší hodnota (233 Vickerse) se nachází na vrcholu výtažku, což potvrzuje simulace v programu AutoForm R8. U větší tloušťky plechu dochází k menšímu zvýšení mikro-tvrđosti vlivem menšího přetvoření plechu. Při provedení zkoušky tažení nedošlo u plechu tloušťky 1,5 mm ke vzniku trhliny. Tato skutečnost se potvrzuje nižší hodnotou zjištěné mikro-tvrđosti.



Obr. 112 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu Erichsen (20 mm)

9.3 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

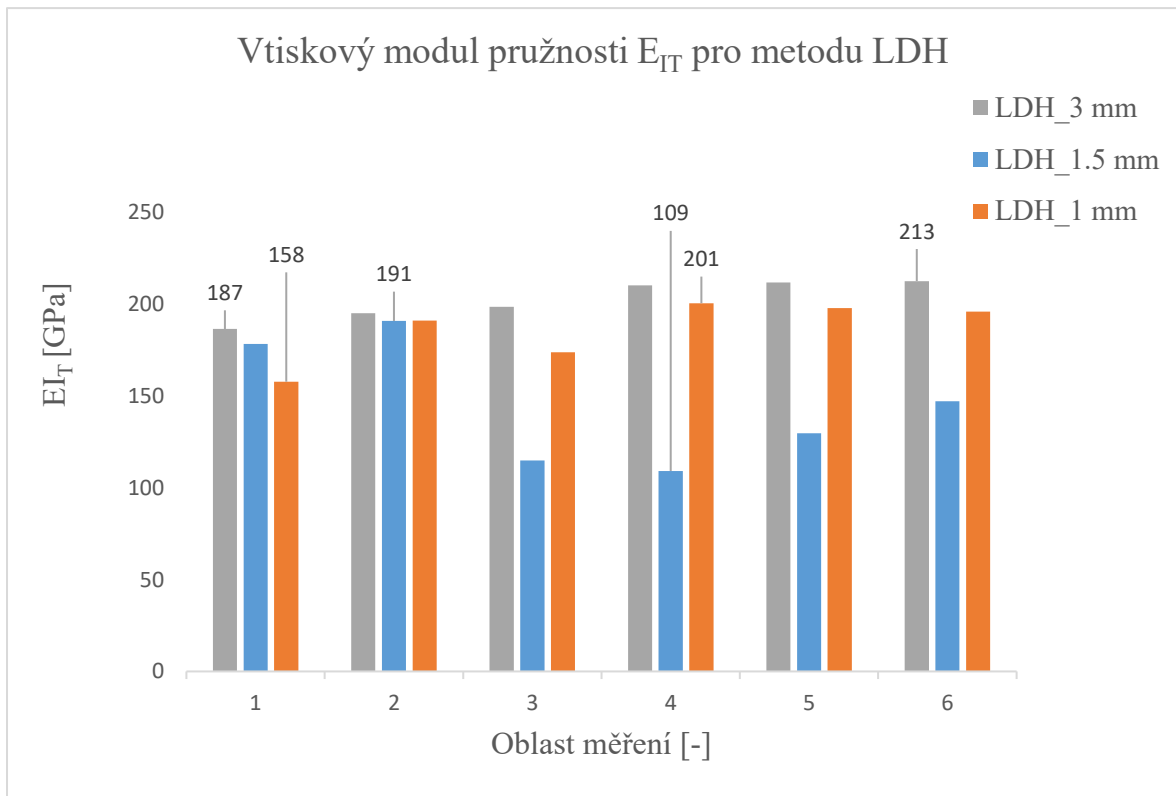
Vtiskový modul pružnosti je materiálovou konstantou, která udává napětí, které je potřebné pro dosažení určité deformace. S rostoucí hodnotou modulu pružnosti se zvyšuje napětí, kterým je nutné působit pro dosažení stejné deformace jako v případě nižší hodnoty modulu.

9.3.1 LDH metoda

Modul pružnosti u plechu tloušťky 3 mm nenabývá značných změn. Nejnížší hodnota 187 GPa je naměřena v oblasti před brzdou. V oblasti použití brzdícího elementu se velikost modulu téměř shoduje pro všechny 3 tloušťky. Za brzdou dochází ke zvýšení modulu pružnosti a v průběhu dalšího tažení se hodnota modulu téměř nemění. Značná tloušťka plechu způsobuje minimální ovlivnění hodnoty modulu v jednotlivých oblastech. Samotný proces tažení modul pružnosti neovlivnil.

Pro plech tloušťky 1 mm vykazuje oblast za brzdícím elementem pokles modulu pružnosti ze 191 GPa na 174 GPa. Při procesu tažení se hodnota modulu pružnosti pohybuje mezi hodnotami 201 – 196 GPa. Tloušťka plechu způsobuje pokles modulu pro menší tloušťku plechu. Nejvíce odlišné je chování plechu o tloušťce 1,5 mm. Při přechodu z oblasti

1 do oblasti 2 dochází ke zvýšení modulu pružnosti stejně, jako v případě ostatních plechů, ale v oblasti 3 a 4 se rapidně snížila hodnota modulu pružnosti. Pro další oblast a vrchol kopule se hodnota zvyšuje. Pro stejně nastavený proces se plech tloušťky 1,5 mm jeví jako nevhodný především kvůli značnému poklesu modulu pružnosti a tedy ztrátě mechanické vlastnosti. Snížení hodnoty modulu je ovlivněno ztenčením plechu a vzniku pnutí, které vyvolávají vznik trhlin v kritické oblasti.



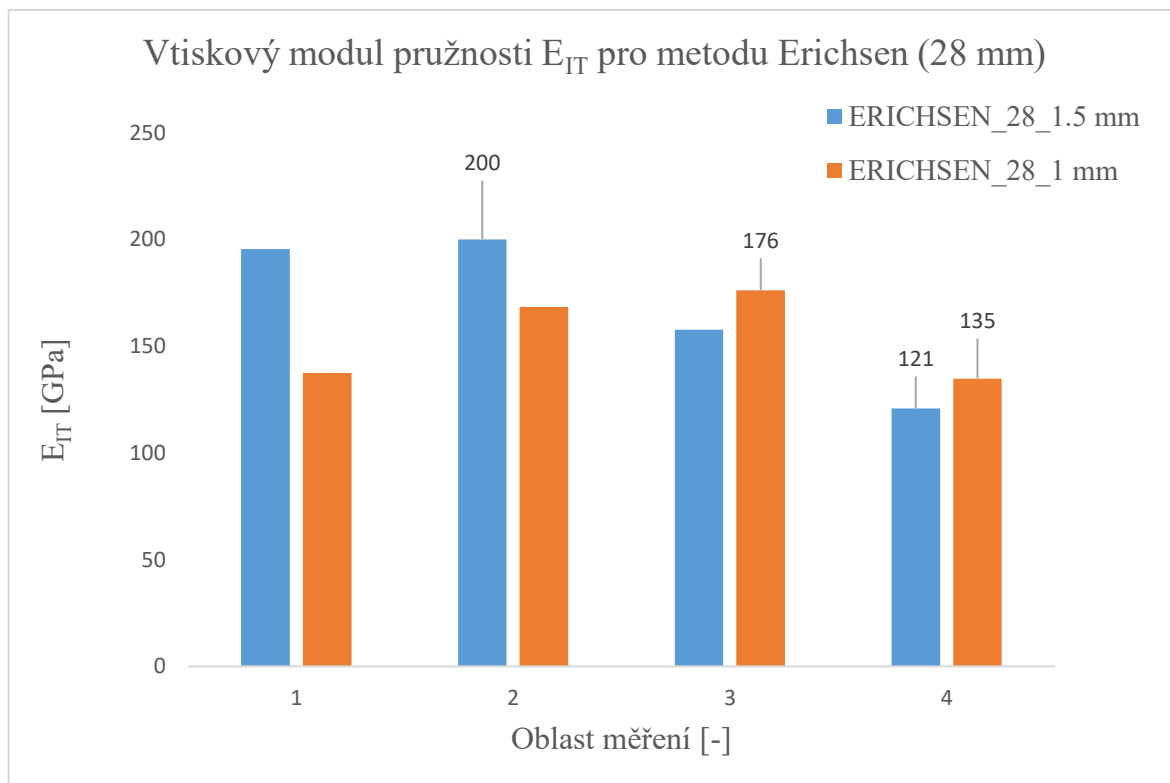
Obr. 113 – Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu LDH

9.3.2 Erichsenova metoda – 28 mm

Při aplikaci Erichsenovy metody (s tažníkem o průměru 28 mm) dochází ke změně hodnot modulu pružnosti pro jednotlivé oblasti. V místě tažení plechu o tloušťce 1 mm dochází k růstu hodnoty modulu pružnosti. Tato hodnota je nejvyšší v oblasti 3, která popisuje průběh tažení kopule. Maximální hodnota modulu byla v tomto místě 176 GPa. Na vrcholku výtažku došlo k poklesu modulu pružnosti na 135 GPa.

Pro plech tloušťky 1,5 mm byla zjištěna podobná hodnota v oblasti 1 i 2. Během tažení kopule dochází k poklesu modulu pružnosti. Důvodem poklesu bude opět ztenčení plechu a hromadění napětí. Hodnoty modulu pružnosti jsou u plechu tloušťky 1 mm nižší, než u plechu o tloušťce 1,5 mm. Vzhledem ke zjištěným výsledkům by bylo nutné zhodnotit použití tloušťky plechů dle požadavků výrobku. U plechu s větší tloušťkou je sice zjištěn

vyšší modul pružnosti, ale v průběhu tažení se jeho hodnota více mění a dosahuje nižších hodnot. V praxi je nutné dbát na geometrii tažníku a tažnice, které způsobují znatelné změny mechanických vlastností v jednotlivých oblastech výtažků. Shodný materiál poukazuje na velké diference jednotlivých výsledků, což v praxi znamená, že nedosáhneme požadované kvality výrobků, bude nutné řešit vzniklé chyby a to vše prodraží samotnou výrobu.



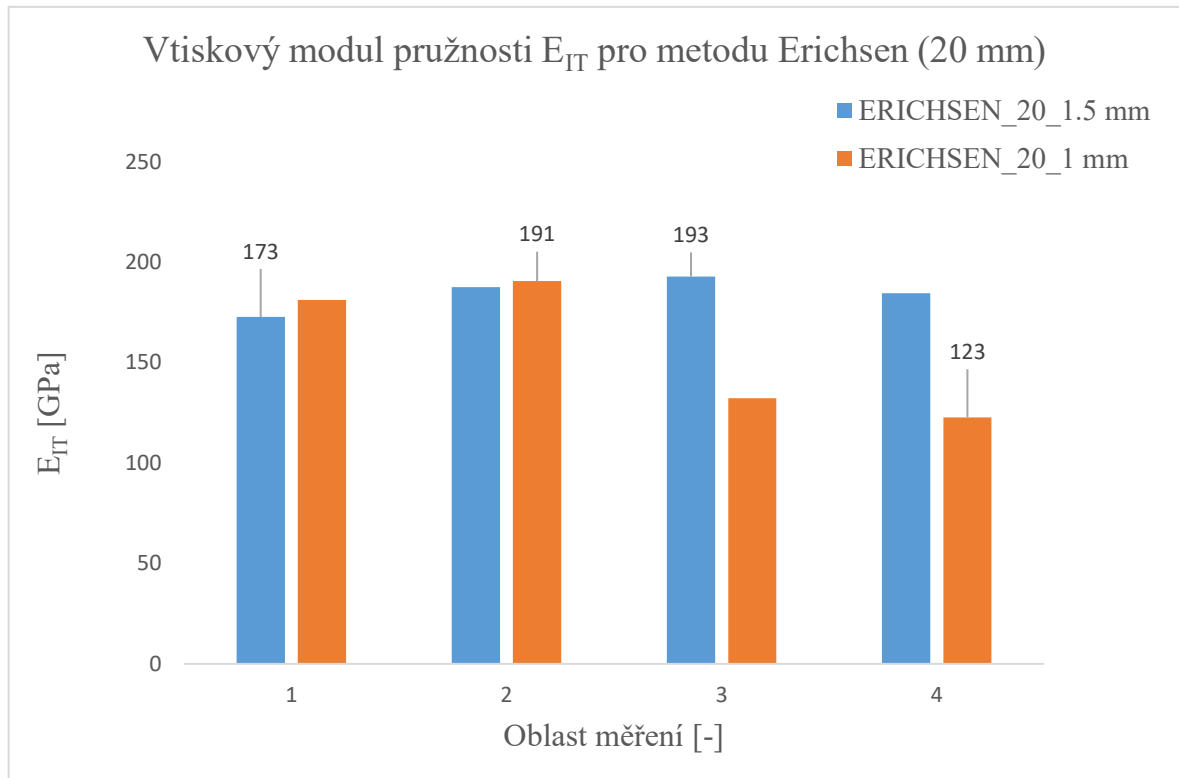
Obr. 114 - Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu Erichsen (28 mm)

9.3.3 Erichsenova metoda – 20 mm

Obr. 115 poukazuje na získání vhodnějších výsledků ve prospěch Erichsenovy metody při využití menšího tažníku pro plech tloušťky 1,5 mm. Pouhá změna tažníku značně ovlivnila výsledky modulu pružnosti. Na počátku tažení plechu (Oblast 1) byla naměřena nižší hodnota modulu pružnosti než v případě měření výtažku o větším průměru. Pro oblast 2 a 3 se hodnota modulu zvyšovala a na vrcholku poklesla z maximální hodnoty 193 GPa na 185 GPa. Dosažená hodnota byla nižší než v případě tažníku s průměrem 28 mm, ale nedochází k výraznému poklesu mezi jednotlivými oblastmi.

Pro plech tloušťky 1 mm se naměřené hodnoty obrátily vzhledem k předchozímu případu. Na výtažku došlo ke zvýšení modulu pružnosti, ale zároveň se zvýšil rozdíl mezi minimální a maximální naměřenou hodnotou. U simulace dochází k porušení v oblasti 3 a 4, což by potvrzovalo i pokles modulu pružnosti. Oblast 1 a 2 vyhazuje podobné chování

jako plech s vyšší tloušťkou. Rizikovým místem je samotné tažení kopule. V grafu jsou vyznačeny hodnoty minimální a maximální hodnoty modulu pružnosti pro obě posuzované tloušťky plechu.



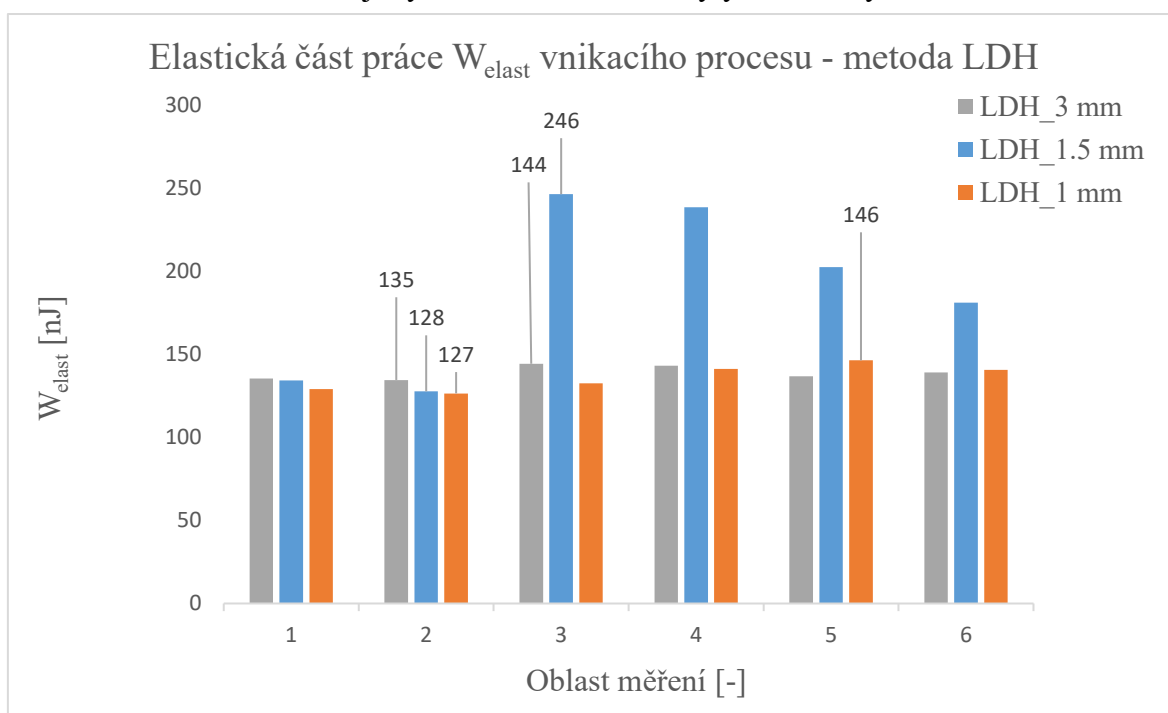
Obr. 115 - Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu Erichsen (20 mm)

9.4 Elastická W_{elast} a plastická W_{plast} část práce vnikacího procesu

Celková mechanická práce indentačního procesu se dělí na plastickou a elastickou práci. Elastická část práce je posuzována jako zbytková práce vynaložená v průběhu odlehčovacího procesu zatížení a popisuje elastickou deformaci, která po odlehčení zatížení zmizí, zatímco plastická část práce zůstává ve formě vtisku o určité hloubce.

9.4.1 LDH metoda

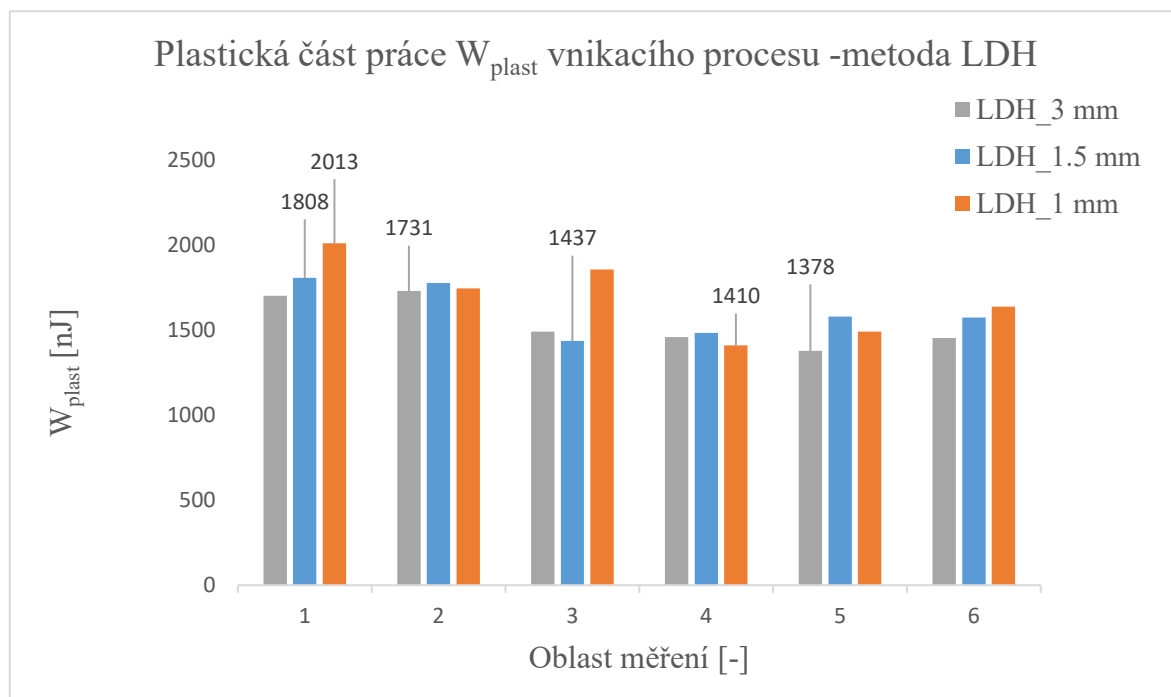
Elastická část práce vnikacího procesu se u plechů o tloušťce 1 mm a 3 mm vzájemně podobá a v posuzovaných oblastech nedochází k výrazným změnám elastické složky práce. Pro plech tloušťky 3 mm byla zjištěna nejnižší hodnota W_{elast} v oblasti brzdy (135 nJ) a nejvyšší hodnota na počátku tažení za brzdou (144 nJ). U plechu tloušťky 1 mm byla nejnižší hodnota naměřena opět v oblasti brzdy. Nejvyšší hodnotu W_{elast} zobrazuje oblast 5 (146 nJ), která odpovídá oblasti tažení kopule v horní části. Tloušťka plechu 1,5 mm poukazuje na odlišné chování. Oblast nejnižší hodnoty elastické práce se nachází v oblasti brzdy stejně jako u předchozích případů, zatímco oblast 3 indikuje téměř dvojnásobnou hodnotu oproti předchozí oblasti. Elastická složka potvrzuje zásadní změny na počátku tažení stejně jako výsledky tvrdosti H_{VT} a modulu pružnosti E_{IT} . V dalších posuzovaných oblastech dochází k částečnému snížení elastické složky práce. Hodnoty W_{elast} i v dalších oblastech dosahují vyšších hodnot než u zbylých dvou výtažků.



Obr. 116 – Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu LDH

Plastická část práce vnikacího procesu pro plech tloušťky 1 mm dosahuje v grafu na Obr. 117 nejvyšší hodnoty plastické práce s hodnotou 2013 nJ. Naměřené hodnoty jsou nejvyšší v oblasti 1 (před brzdou) a dále v oblasti 3 (za brzdou) s hodnotou 1858 nJ. V průběhu tažení kopule jsou hodnoty nižší a opět se zvětšují směrem k vrcholku výtažku.

Při měření tloušťky plechu 1,5 mm bylo maximum plastické práce zjištěno v oblasti před brzdou, další nejvyšší hodnota byla naměřena v místě brzdy. Za brzdícím elementem došlo k poklesu hodnoty W_{plast} na 1437 nJ, což je nejnižší hodnota pro tloušťku plechu 1,5 mm. Plech nejvyšší tloušťky dosahuje nejnižších hodnot plastické práce mezi jednotlivými plechy. Naměřené maximum v oblasti brzdy dosahuje hodnoty 1731 nJ. V dalších měřených oblastech dochází ke snížení velikosti plastické práce. Poslední hodnocený bod na vrcholku výtažku zobrazuje mírné zvýšení hodnoty W_{plast} . Hodnota plastické práce poukazuje na zvýšení hodnoty W_{plast} pro tenké plechy, zatímco u plechů s větší tloušťkou dosahují hodnoty plastické práce nižších hodnot.

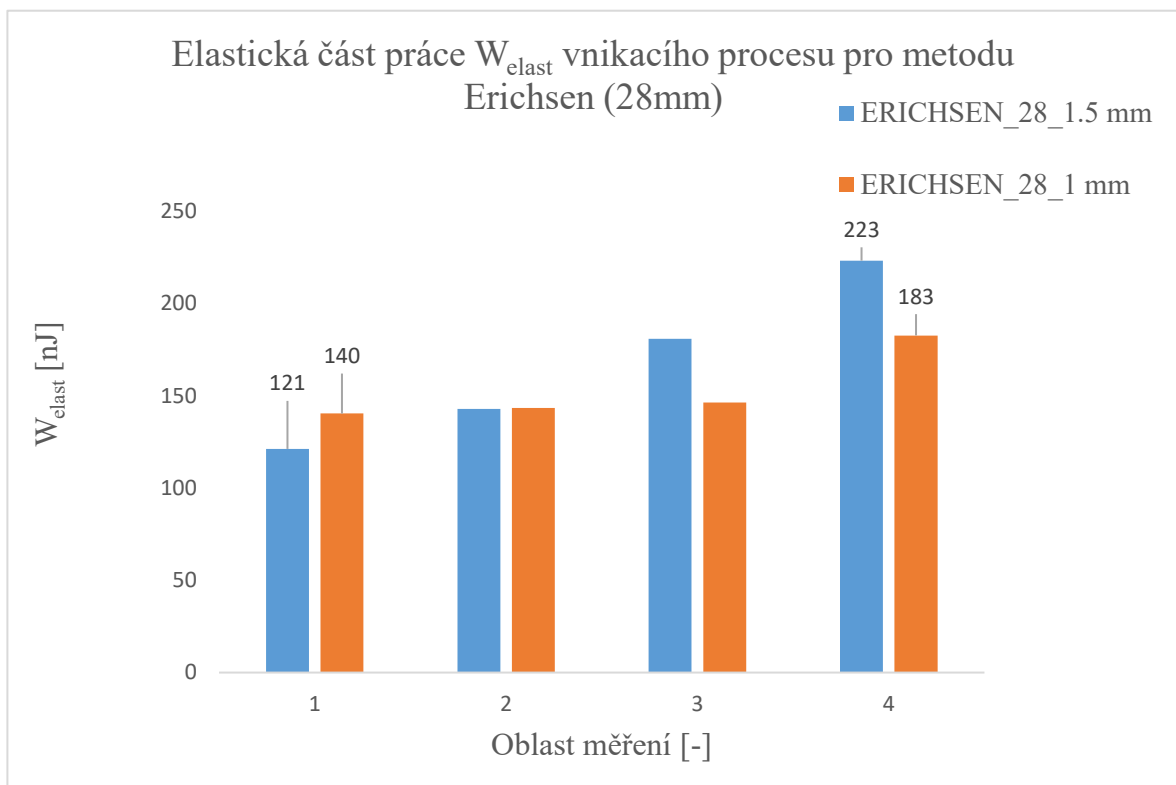


Obr. 117 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu LDH

Vzájemné porovnání grafů elastické a plastické práce poukazuje na značný podíl plastické složky práce vzhledem k elastické složce. Hodnoty plastické práce jsou u největší tloušťky plechu nejnižší a rostou s klesající tloušťkou plechu. Elastická práce u plechu tloušťky 1,5 mm poukazuje na odlišné chování, které je ovlivněno změnou mechanických vlastností vlivem procesu hlubokého tažení.

9.4.2 Erichsenova metoda – 28 mm

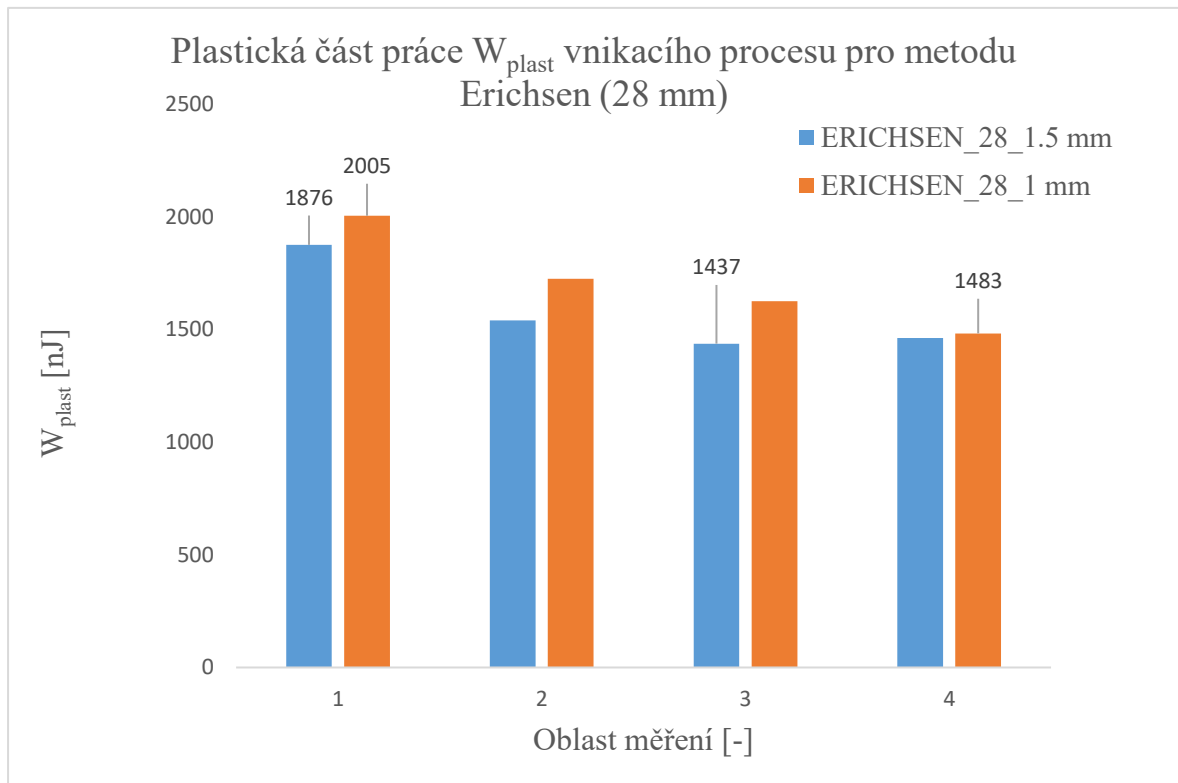
Hodnoty elastické práce se u Erichsenovy zkoušky s tažníkem o průměru 28 mm odlišují. Pro plech tloušťky 1 mm se v oblastech 1 až 3 hodnota elastické složky práce mění jen velmi málo. Na vrcholku výtažku je hodnota elastické práce nejvyšší (183 nJ). Hodnoty oblastí 1 až 3 se podobají těm, které byly zjištěny u zkušební metody LDH. V případě měření plechu o tloušťce 1,5 mm docházelo ke zvyšování hodnoty elastické práce směrem k vrcholku výtažku. Nejvyšší hodnota 223 nJ byla naměřena na vrcholku výtažku.



Obr. 118 - Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (28 mm)

Naměřená plastická práce (Obr. 119) se pro plech tloušťky 1 mm snižuje vzhledem k hloubce výtažku. Nejvyšší hodnota plastické práce byla naměřena v oblasti 1, která není značně ovlivněna procesem tažení. Pokud se budeme posouvat směrem k vrcholku výtažku, bude hodnota klesat kvůli ovlivnění tažením plechu.

U plechu tloušťky 1,5 mm dochází k podobnému průběhu naměřených hodnot W_{plast} jako v případě druhého posuzovaného plechu. Hodnota práce klesá směrem k vrcholku výtažku. Velikost plastické práce je nižší vzhledem k plechu s menší tloušťkou.



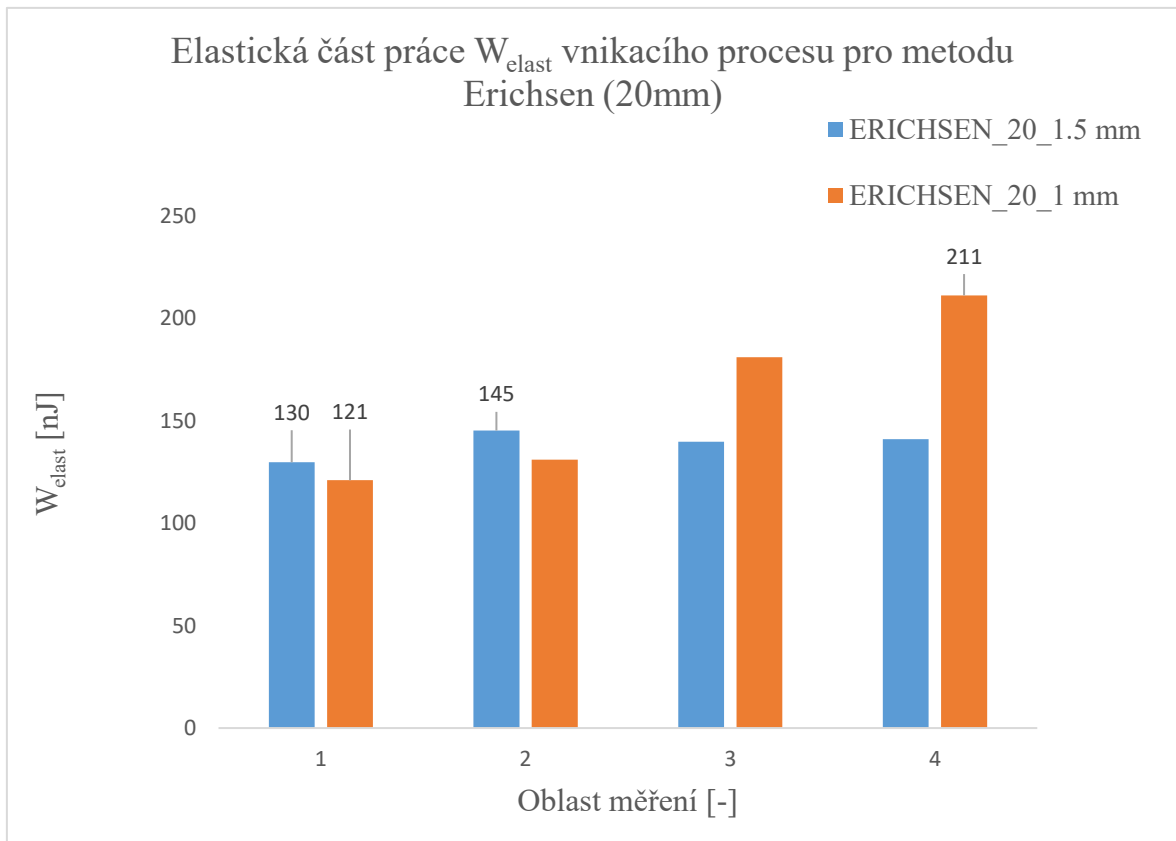
Obr. 119 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (28 mm)

Elastická práce znázorňuje zvyšování hodnoty práce směrem k vrcholku výtažku, kde dochází ke značnější změně mechanických vlastností. Opačný průběh znázorňuje plastická práce, která se k vrcholku výtažku snižuje. U plechu tloušťky 1,5 mm je vyšší podíl elastické práce než u plechu tloušťky 1 mm. Plastická práce nabývá vyšších hodnot u plechu s menší tloušťkou.

9.4.3 Erichsenova metoda – 20 mm

Pro zkušební metodu Erichsen s nejmenším tažníkem byla měřená elastická práce ovlivněna změnou tažníku. U plechu tloušťky 1 mm dochází k postupnému zvyšování hodnoty elastické práce směrem k vrcholku výtažku. Oblast 1 a 2 (počátek tažení) dosahuje podobných naměřených hodnot jako u elastické práce pro tažník 28 mm. Změna nastává v průběhu tažení kopule. Oblast 3 a 4 poukazuje na podobné zvýšení hodnot jako u plechu 1,5 mm pro Erichsenovu zkoušku s tažníkem 28 mm. Maximum W_{elast} na vrcholu výtažku dosahuje hodnoty 211 nJ.

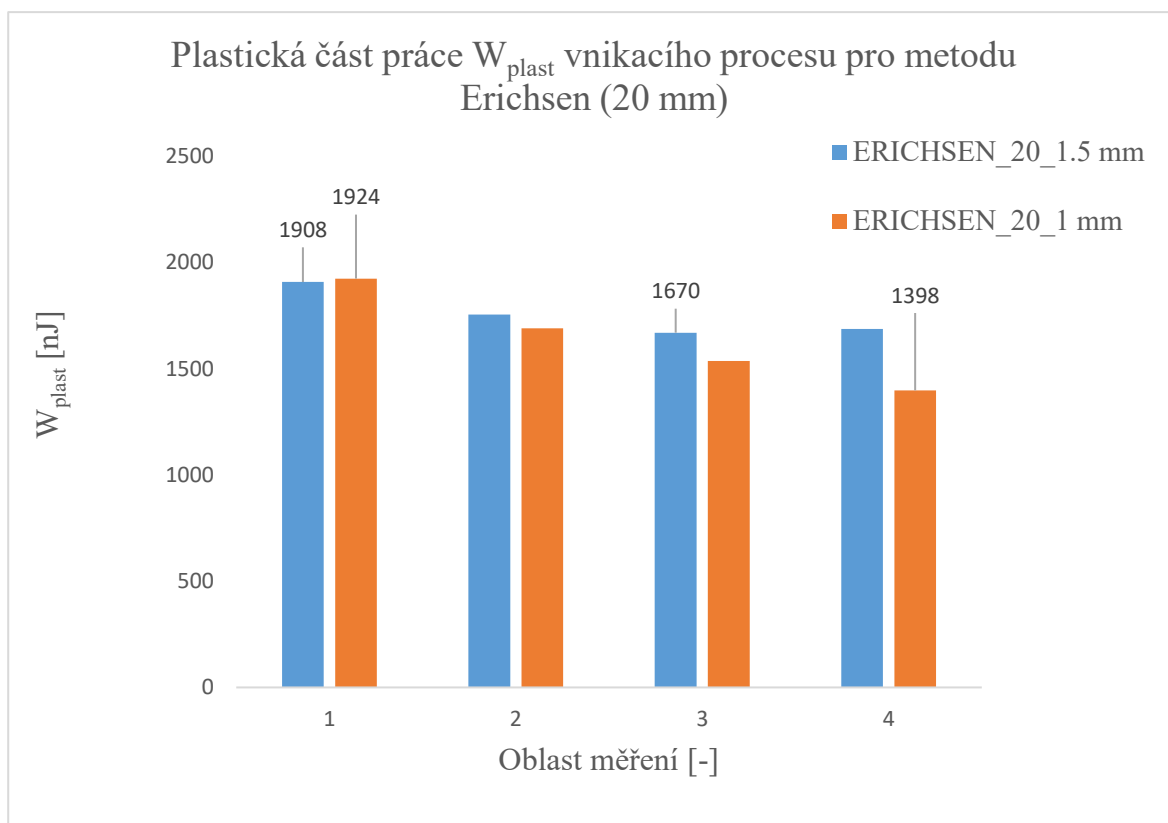
U plechu s větší tloušťkou dochází ke zvýšení hodnoty elastické práce v počátku tažení kopule, kde je naměřeno maximum 145 nJ. V průběhu tažení kopule hodnota lehce poklesne a na vrcholku výtažku se znovu mírně zvýší. Hodnoty elastické složky práce dosahují pro plech 1 mm vyšších hodnot než pro plech tloušťky 1,5 mm.



Obr. 120 - Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (20 mm)

Průběh plastických složek (pro Erichsenovu zkoušku s menším tažníkem) pro plech tloušťky 1 mm je podobný jako u většího tažníku. Hodnota plastické práce klesá směrem k vrcholku výtažku. Použití menšího tažníku způsobuje odlišné tváření výtažku, které je doprovázeno nižší hodnotou plastické práce. Maximální hodnota plastické práce nabývá hodnoty 1924 nJ. Nejnížší hodnota na vrcholku výtažku dosáhla velikosti 1398 nJ.

Pro plech s větší tloušťkou došlo ke zvýšení maximální hodnoty plastické práce. Od oblasti 1 do oblasti 3 dochází ke snížení hodnot práce. Ve vrcholku výtažku se práce nepatrně zvýšila. Zjištěná hodnota plastické práce je ovlivněna změnou tažných nástrojů. Jednotlivé naměřené hodnoty jsou svými průběhy podobné a záleží tedy více na nastavení tažného procesu pro jednotlivé tloušťky plechu. Nižší tloušťka plechu může být tedy výhodnější v kombinaci s větším průměrem tažníku.



Obr. 121 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (20 mm)

DISKUZE VÝSLEDKŮ

Ke zvlnění plechu nedocházelo anebo pouze zanedbatelně, což lze považovat za nepodstatný problém při tažení tohoto tvaru výtažku. Se snižující se tloušťkou plechu docházelo dle simulace ke zvýšení velikosti a oblasti zvlnění plechu. Pro obě metody se výsledky výrazně nelišily u plechů tloušťky 1 mm a 1,5 mm. Větší tloušťku nelze porovnat kvůli odlišné geometrii tažníků. U metody LDH se zvlnění nachází po celém obvodu výtažku, zatímco u Erichsen je symetricky v jednom místě.

Pro vyhodnocení parametru ztenčení byla zjištěna změna tloušťky plechu v oblasti tažení kopule. Simulace poukazovala na maximální ztenčení 30 %. Ztenčení se liší pro jednotlivé tloušťky, protože se vyhodnocuje z původní tloušťky plechu. U plechu 1 mm se tedy ztenčení pohybuje okolo 0,3 mm, ale u plechu tloušťky 3 mm je to více než 1 mm. Nejvyšší hodnoty ztenčení se projevují v průběhu tažení výtažku a směrem k vrcholu pak mírně poklesnou.

Z výsledků maximálního porušení lze vyvodit zvětšující se oblast porušení a zvýšení porušení při klesající tloušťce plechu. Pro vyráběný díl je tedy nutné správně zvolit tloušťku přístřihu plechu pro požadovanou aplikaci. Pro metodu Erichsen se porušení projevuje v horní části kopule, což odpovídá reálnému procesu tažení, kde na vrcholku výtažku došlo k porušení plechu. U metody LDH se jako nejnebezpečnější oblast projevuje průběh tažení kopule, kde dochází k tzv. utržení dna výtažku. Pro menší tloušťku plechu v kombinaci s velkým průměrem tažníku dochází ke zvýšení pravděpodobnosti porušení výtažku.

Podobných výsledků jako u maximálního porušení je dosaženo u výsledků tvářitelnosti. Oblast porušení poukazuje na nebezpečnou oblast v horní části kopule pro metodu Erichsen. Metoda LDH vykazuje problém v průběhu tažení výtažku a ke zvýšení nebezpečné oblasti dochází opět se snižující se tloušťkou plechu.

K porovnání reality se simulací slouží výsledky získané měřením mechanických vlastností na jednotlivých vzorcích. Na průběhy grafů pro jednotlivé mechanické vlastnosti má vliv především tloušťka plechu, předpokládané ztenčení plechu a geometrie tažných nástrojů a pomocných brzdících elementů. Hodnoty porušení a tvářitelnosti ze simulace označují místa, ve kterých je patrná změna hodnot mechanických vlastností. Důležitými výsledky měření jsou hodnoty tvrdosti a modulu pružnosti, jejichž zvýšení nebo snížení vede k porušení výtažku a vzniku defektů. Místa změn vlastností odpovídají kritickým místům ze simulace.

Hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} a mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} se liší hodnotami, ale shodují se průběhy grafů z naměřených hodnot. U metody LDH se mechanické vlastnosti zásadně mění pro jednotlivé tloušťky plechů. Zatímco plech tloušťky 3 mm dosahuje v celém spektru téměř nejvyšších hodnot a maximum tvrdosti bylo naměřeno v oblasti průběhu tažení (oblast 4 a 5), plech tloušťky 1 mm vykazuje snížení tvrdosti za brzdícím elementem a následně skokový nárůst na maximální hodnotu v průběhu tažení kopule (oblast 4). V případě plechu tloušťky 1,5 mm byla nejvyšší hodnota naměřena v oblasti 3 za brzdou. Dle výsledků lze konstatovat, že simulace sice poukazuje na nebezpečnou oblast v průběhu tažení, ale pro plech tloušťky 1,5 mm je tato oblast již v počátku tažení kopule, což simulace nevyhodnocuje jako oblast největšího nebezpečí. Každá geometrie a použití odlišných tažných nástrojů může vykazovat značně odlišné výsledky a je velmi složité zjistit, co je důvodem porušení daných dílů. Měření dále poukazuje na důležitost všech parametrů tažení, které ovlivňují výsledné vlastnosti pro budoucí použití dílů.

Pro metodu Erichsen s tažníkem o průměru 28 mm byla nejvyšší tvrdost naměřena u plechu tloušťky 1,5 mm v oblasti 3, což označuje opět průběh tažení kopule, ale u nižší tloušťky byla nejvyšší tvrdost na vrcholku. Z hlediska tvrdosti by tedy mohl být problém spíše u plechu s větší tloušťkou, u kterého by vlivem vyšší tvrdosti došlo k utržení dna.

Při použití odlišné geometrie (tažník o průměru 20 mm) se naměřené vlastnosti vlivem procesu změny, plech tloušťky 1,5 mm vykazuje nižší hodnoty tvrdosti, zatímco plech s nejnižší tloušťkou dosahuje maxima tvrdosti na vrcholu výtažku. Nebezpečí utržení roste směrem k vrcholu výtažku a v tomto případě by tloušťka plechu 1 mm mohla vykazovat kvůli zvýšení tvrdosti defekty.

U vtiskového modulu pružnosti E_{IT} u LDH metody dochází opět ke značné změně dané mechanické vlastnosti. V případě nejsilnějšího plechu dochází k postupnému zvyšování modulu až k vrcholu výtažku. Nejvyšší změna je patrná v oblastech 4, 5 a 6, což částečně odpovídá simulaci, avšak nejvyšší hodnota je na vrcholku, což simulace nezobrazila. Hodnoty se však liší velmi málo a proto by k prasknutí došlo nejčastěji v oblasti 5 a 6, což simulace ukázala jako nejnebezpečnější oblast. U plechu s nejnižší tloušťkou došlo k částečnému snížení za brzdou a následně se hodnota dostane na maximum. Oblast 4 (průběh tažení) tedy poukazuje na zvýšení modulu pružnosti vlivem procesu tažení. Pro plech tloušťky 1,5 mm dochází za brzdícím elementem k razantnímu poklesu modulu pružnosti, což může způsobit porušení výtažku, směrem k vrcholu se modul opět zvyšuje, ale dosahuje nižších hodnot, než v případě zbylých dvou plechů. Tloušťka 1,5 mm se

celkově vyznačuje odlišnými průběhy mechanických vlastností než u ostatní tloušťky plechu.

Vtiskový modul pružnosti u metody Erichsen (průměr tažníku 28 mm) se směrem k vrcholu výtažku snižuje pro plech tloušťky 1,5 mm. U plechu tloušťky 1 mm dochází ke zvýšení modulu od počátku tažení a maximum je dosaženo v oblasti průběhu tažení. Na vrcholku výtažku modul pružnosti poklesne. Odlišná tloušťka plechu se projevuje změnou modulu pružnosti a ovlivňuje nebezpečné místo tažení. U větší tloušťky může dojít k porušení vlivem poklesu modulu pružnosti, zatímco u menší tloušťky se nárůst modulu pružnosti může projevit praskáním. Pro Erichsenovu metodu s menším tažníkem dochází u plechu tloušťky 1,5 mm k postupnému zvýšení modulu pružnosti až do oblasti 3 (průběh tažení kopule) a následuje pokles na vrcholku výtažku. Maximální hodnoty se oproti většímu tažníku velmi neliší. Opačný problém nastává v případě plechu tloušťky 1 mm. Na počátku tažení se modul pružnosti zvyšuje a maxima dosahuje na počátku tažení. Prudký pokles modulu pružnosti se projevil v průběhu tažení kopule. Vzhledem k naměřeným mechanickým vlastnostem by byl pro menší tažník vhodnější plech s větší tloušťkou, u kterého nedochází ke skokové změně mechanických vlastností. Pro větší tažník by bylo lepší zvolit plech s menší tloušťkou. V tomto případě sice ke změně vlastností došlo, ale mezi minimální a maximální hodnotou není takový rozdíl jako plechu s větší tloušťkou. U jednotlivých metod lze pozorovat značné rozdíly mezi metodami Erichsen a LDH na počátku tažení. U plechu tloušťky 1 mm má oblast 1 (s brzdícím elementem u metody LDH) modul pružnosti 158 GPa, pro Erichsena s větším tažníkem se dosáhlo hodnoty 138 GPa a u menšího tažníku se hodnota pohybuje okolo 181 GPa. Změny jsou ovlivněny použitím brzdících elementů a způsobem tažení dle tažného nástroje. Větší tažník způsobí pokles modulu pružnosti a menší tažník ovlivní materiál zvýšením modulu pružnosti. V případě využití brzdy by k ovlivnění materiálu mělo dojít pouze minimálně, avšak stále hraje roli tloušťka plechu, která ovlivnila naměřenou hodnotu.

Elastická práce u metody LDH poukazuje na rozdíly mezi jednotlivými tloušťkami plechů. Z naměřených hodnot je patrný rozdíl průběhů pro jednotlivé tloušťky plechů. Zajímavostí je však téměř dvojnásobné zvýšení práce pro plech tloušťky 1,5 mm a následný pokles, který však nabývá vyšších hodnot oproti zbylým dvěma plechům. Elastická část práce může být ovlivněna výše zmíněným poklesem modulu pružnosti, což se projeví zvýšením elastické práce. U metody Erichsen (tažník o průměru 28 mm) dochází u obou plechů k postupnému zvyšování elastické práce směrem k vrcholu výtažku. Hodnota

maxima pro plech tloušťky 1 mm se oproti LDH metodě značně zvýšila, druhý zmíněný plech dosahuje podobné maximální hodnoty jako v případě LDH metody, změnila se však oblast maxima. Pro zkoušku s menším tažníkem se plech tloušťky 1,5 mm projevuje konstantnějšími hodnotami a poukazuje na menší rozdíl minima a maxima elastické práce. Opačný efekt lze pozorovat u nejtenčího plechu, kde dochází ke značnému nárůstu směrem k vrcholku výtažku, a hodnoty se blíží podobně vysokým hodnotám jako u plechu 1,5 mm pro předchozí metodu Erichsen.

Pro plastické složky vnikacího procesu se průběhy odlišují a lze vyhodnotit, že s větší tloušťkou plechu dochází ke snížení hodnoty plastické práce. Nejvyšších hodnot dosahuje plech tloušťky 1 mm. Plastická práce tvoří podstatnou část energie vnikacího procesu vzhledem k elastické složce, která má přibližně desetinovou hodnotu. U metod podle Erichseny se naměřená hodnota snižuje směrem k vrcholku pro oba tažníky i tloušťky plechů. Nejvyšší hodnota plastické práce byla naměřena v oblasti málo ovlivněného plechu, nejnižší hodnota se pohybuje v horní oblasti tažení nebo vrcholku výtažku. Plech tloušťky 1 mm dosahuje opět vyšších hodnot a rozdíl mezi jednotlivými oblastmi je vyšší než v případě plechu s vyšší tloušťkou. Plastickou práci ovlivňuje volba materiálu i nastavení procesu tažení s jednotlivými typy nástrojů.

ZÁVĚR

V diplomové práci byl popsán postup provedení zkoušky hlubokého tažení na vybraném plechu 1.4376 pro tloušťky 3 mm, 1,5 mm a 1 mm. Zkoušky byly prováděny pro metodu podle Erichsena, u které byl použit větší tažník o průměru 28 mm a menší tažník o průměru 20 mm. Další zkouška hluboko tažnosti nazvaná LDH (limiting dome height) využívá brzdící drážky a tažník o průměru 70,2 mm. Erichsenovou zkouškou byly hodnoceny plechy tloušťky 1 mm a 1,5 mm. Metoda LDH byla aplikována pro všechny tloušťky plechu. Po provedení zkoušek hlubokého tažení se připravily vzorky, které reprezentují odlišnosti tažení materiálů v jednotlivých oblastech výtažku. Měřicí strategie uvažovala místa před vznikem výtažku, v místě brzdy a za brzdou pro LDH metodu, počáteční oblast tažení, průběh tažení kopule a vrchol výtažku. Vytvořené části výtažků byly zalisovány do pryskyřice a následně vybroušeny. Na vybroušené ploše lze měřit požadované mechanické vlastnosti a zjišťovat potřebné rozdíly. Celkem bylo vytvořeno 6 vzorků, které obsahovaly jednotlivé segmenty pro stanovené tloušťky plechu. Zjišťování mechanických vlastností probíhalo pomocí instrumentované zkoušky tvrdosti DSI (depth sensing indentation). Metodou DSI lze získat vtiskovou tvrdost H_{IT} , tvrdost podle Vickerse H_{VIT} , modul pružnosti E_{IT} a složky práce elastických a plastických složek vnikacího procesu. Proces hlubokého tažení byl podložen simulací hlubokého tažení v programu AutoForm R8. Nastavené parametry simulace se blížily reálné zkoušce plechů. Pro jednotlivé typy zkoušek (Erichsen 28, Erichsen 20 a LDH) byla připravena samostatná simulace respektující materiál, tloušťku plechu a použité nástroje tažení. Jako vyhodnocení byly řešeny parametry maximálního porušení (max failure), ztenčení (thinning) a tváření (FLD diagram).

Naměřené hodnoty jsou podloženy výsledky ze simulace a v reálném procesu se prokázaly pouze výjimky v odlišnostech mezi praxí a simulací. Složitý proces hlubokého tažení nelze ovlivnit změnou jediného parametru a je nutné dbát na průběh celého procesu, který se skládá z výběru materiálu, tloušťky materiálu, typu tažného zařízení, tažných nástrojů, pomocných elementů a přípravků. V diplomové práci je patrná změna mechanických vlastností, jako je vtisková tvrdost, modul pružnosti a velikost práce vnikacího procesu pro stejný materiál s pouhou změnou tloušťky a nástrojů procesu. Ve výrobním procesu je nezbytné hlídat všechny parametry a předejít tak vzniku defektů, které mohou špatným výběrem parametrů vznikat. Průběhy tvrdosti i modulu pružnosti mají vliv na budoucí funkci dílu a změna parametrů výtažek negativně ovlivní. Práce diskutuje jednotlivé změny v oblastech a důvody změny mechanických vlastností.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KUMAR, Surrender. Technology of metal forming processes. New Delhi: Phi Learning Private Limited, 2008. ISBN 978-81-203-3425-0
- [2] LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6
- [3] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu I. 2., opr. a rozš. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 80-720-4283-1
- [4] FOREJT, Milan. Teorie tváření. Vyd. 2., v Akademickém nakladatelství CERM 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2764-7
- [5] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5
- [6] Mechanisms of Plastic Deformation in Metals [online]. 2021-5-31, 43-80 [cit. 2021-9-24]. Dostupné z: doi:10.1017/9781108943369.005
- [7] MCWILLIAMS, Kevin. PART II: Mechanics of Materials, Fracture Behavior, and S-N Curves. Boulder [online]. 2020 [cit. 2021-9-24]. Dostupné z: <https://www.boulderes.com/resource-library/fatigue-life-part-2>
- [8] LENFELD, Petr. Technologie II. Vyd. 2. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2009. ISBN 978-80-7372-466-5
- [9] KURCIK, Jan. Tváření. Techstroj [online]. 2012 [cit. 2021-9-14]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T06.pdf> (Obrázek s popisem)
- [10] MERKLEIN, M., J.M. ALLWOOD, B.-A. BEHRENS, et al. Bulk forming of sheet metal. CIRP Annals [online]. 2012, 61(2), 725-745 [cit. 2021-9-24]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2012.05.007
- [11] GROOVER, Mikell P. Fundamentals of Modern Manufacturing. 4. vydání. United States: John Wiley, 2011. ISBN 978-0470-467002
- [12] LARSSON, Joakim, Anton JANSSON a Patrikw KARLSSON. Monitoring and evaluation of the wire drawing process using thermal imaging. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2019, 101(5-8), 2121-2134 [cit. 2021-9-29]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-018-3021-7

- [13] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9
- [14] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. Základy strojírenské technologie I. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-800-1060-568
- [15] WANG, Darren, ed. Handbook of metal forming process. New York: NY research press, [2015], vi, 212 s. ISBN 978-1-63238-253-5
- [16] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 9788021447479
- [17] BOLJANOVIC, Vukota. Sheet metal forming processes and die design. New York: Industrial Press, 2004. ISBN 08-311-3182-9
- [18] TATÍČEK, František. Akademie tváření: Hluboké tažení. Mmspektrum [online]. Praha, 2011, 22.11.2011 [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/akademie-tvareni-hluboke-tazeni>
- [19] LENFELD, Petr. Technologie plošného tváření - tažení. Ksp.tul [online]. Liberec: Petr Lenfeld [cit. 2021-8-31]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/09.htm (Obrázek s popisem)
- [20] BALLIKAYA, Hasan, Vedat SAVAS a Cetin OZAY. The limit drawing ratio in die angled hydromechanical deep drawing method. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology [online]. 2020, 106(1-2), 791-801 [cit. 2022-02-04]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: doi:10.1007/s00170-019-04624-y
- [21] HOFFMAN, H. a SCHULER. Metal Forming Handbook. 2. vydání. Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012. ISBN 3642588573
- [22] BODHE, Arvind B., Nitin K. MANDAVGADE a Amit TAJNE. Selection of Blank Size for Deep Drawing of Rectangular Parts. Smart Technologies for Energy, Environment and Sustainable Development [online]. Singapore: Springer Singapore, 2019, 2019-07-03, 663-672 [cit. 2022-02-04]. Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering. ISBN 978-981-13-6147-0. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-13-6148-7_64
- [23] ČADA, Radek. Technologie I. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008]. ISBN 978-80-248-1507-7

- [24] TEKKAYA, A. Erman, Hossein KARBASIAN, Werner HOMBERG a Matthias KLEINER. Thermo-mechanical coupled simulation of hot stamping components for process design. *Production Engineering* [online]. 2007, 1(1), 85-89 [cit. 2021-11-10]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-007-0025-9
- [25] LAZARESCU, Lucian, Ioan NICODIM a Dorel BANABIC. Evaluation of Drawing Force and Thickness Distribution in the Deep-Drawing Process with Variable Blank-Holding. *Key Engineering Materials* [online]. 2015, 639, 33-40 [cit. 2021-11-10]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.639.33
- [26] FREISSE, Hannes, Thomas SEEFELD, F. VOLLERTSEN, T.A. DEAN, Y. QIN a S.J. YUAN. Tool surface with a supporting plateau of hard particles for deep drawing of high alloy steel. *MATEC Web of Conferences* [online]. 2018, 190 [cit. 2021-11-10]. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201819014006
- [27] WITULSKI, J., M. TROMPETER, A.E. TEKKAYA a M. KLEINER. High wear resistant deep drawing tools made of coated polymers. *CIRP Annals* [online]. 2011, 60(1), 311-314 [cit. 2021-11-12]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2011.03.149
- [28] QIN, Yi, Wan-Nawang W.A. a Jie ZHAO. Forming of Micro-sheet Metal Components. *Micromanufacturing Engineering and Technology* [online]. Elsevier, 2015, 2015, 299-322 [cit. 2021-11-10]. ISBN 9780323311496. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-323-31149-6.00013-X
- [29] CARLEER, B., I. BURCHITZ a M. STIPPAK. Systematic drawbead design. <https://formingworld.com> [online]. 2019, 2019 [cit. 2021-11-12]. Dostupné z: <https://formingworld.com/systematic-drawbead-design/>
- [30] I. O. ZAID, Adnan. Effect of Different Lubricants on Deep Drawing of Galvanized Steel. *International Journal of Scientific & Engineering Research* [online]. 2017, 2017, 8(1), 1584 - 1589 [cit. 2021-11-12]. ISSN 2229-5518. Dostupné z: <https://www.ijser.org/researchpaper/Effect-of-Different-Lubricants-on-Deep-Drawing-of-Galvanized-Steel.pdf>
- [31] SZPUNAR, Marcin, Tomasz TRZEPIECIŃSKI, Krzysztof ŻABA, Robert OSTROWSKI a Marek ZWOLAK. Effect of Lubricant Type on the Friction Behaviours and Surface Topography in Metal Forming of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Sheets. *Materials* [online]. 2021, 14(13) [cit. 2021-11-12]. ISSN 1996-1944. Dostupné z: doi:10.3390/ma14133721

- [32] DWIVEDI, Rashmi a Geeta AGNIHOTRI. Study of Deep Drawing Process Parameters. *Materials Today: Proceedings* [online]. 2017, 4(2), 820-826 [cit. 2021-9-16]. ISSN 22147853. Dostupné z: doi:10.1016/j.matpr.2017.01.091
- [33] SAHU, Y. K. a M. K. PRADHAN. Modelling and Simulation of Deep Drawing Process of Circular Cup on AL1200 Using Finite Element Analysis. *Advances in Simulation, Product Design and Development* [online]. Singapore: Springer Singapore, 2020, 2020-11-07, 29-42 [cit. 2021-11-12]. *Lecture Notes on Multidisciplinary Industrial Engineering*. ISBN 978-981-32-9486-8. Dostupné z: doi:10.1007/978-981-32-9487-5_3
- [34] SCHREIJAG, Simone. *Microstructure and Mechanical Behavior of Deep Drawing DC04 Steel at different length scales*. 18rd ed. KIT Scientific Publishing, 2013. ISBN 978-3-86644-967-1
- [35] HU, Ping, Ning MA a Yi-guo ZHU. *Theories, methods and numerical technology of sheet metal cold and hot forming: analysis, simulation and engineering applications*. London: Springer, [2013], xiv, 210 s. Springer series in advanced manufacturing. ISBN 978-1-4471-4098-6
- [36] FOREJTOVÁ, Lucie, Ladislav KOLAŘÍK, Jan SUCHÁNEK, Marie KOLAŘÍKOVÁ a Tomáš PILVOUSEK. Svařitelnost ocelí pro automobilové karoserie: Výroba a technologie. *Mmspektrum* [online]. Praha, 2017, 8.3.2017 [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>
- [37] KURODA, M., A. UENISHI, H. YOSHIDA a A. IGARASHI. Ductility of interstitial-free steel under high strain rate tension: Experiments and macroscopic modeling with a physically-based consideration. *International Journal of Solids and Structures* [online]. 2006, 43(14-15), 4465-4483 [cit. 2021-11-23]. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.06.076
- [38] SANTOS, Andrea Pedroza da Rocha, Thais Conde da MOTA, Heber Vieira Gomes SEGUNDO, Luiz Henrique DE ALMEIDA, Leonardo Sales ARAÚJO a Adriana da Cunha ROCHA. Texture, microstructure and anisotropic properties of IF-steels with different additions of titanium, niobium and phosphorus. *Journal of Materials Research and Technology* [online]. 2018, 7(3), 331-336 [cit. 2021-11-23]. ISSN 22387854. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmrt.2018.04.009

- [39] RAY, R. K., P. GHOSH a D. BHATTACHARJEE. Effects of composition and processing parameters on precipitation and texture formation in microalloyed interstitial free high strength (IFHS) steels. *Materials Science and Technology* [online]. 2013, 25(9), 1154-1167 [cit. 2021-11-23]. ISSN 0267-0836. Dostupné z: doi:10.1179/174328409X453280
- [40] PERELOMA, E. a I. TIMOKHINA. Bake hardening of automotive steels. *Automotive Steels* [online]. Elsevier, 2017, 2017, 259-288 [cit. 2021-11-23]. ISBN 9780081006382. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-100638-2.00009-2
- [41] Bake hardening steel [online]. [cit. 2021-11-23]. Dostupné z: <https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/HYTSS/BH>
- [42] Steels for aircraft structures. *Introduction to Aerospace Materials* [online]. Elsevier, 2012, 2012, 232-250 [cit. 2021-11-26]. ISBN 9781855739468. Dostupné z: doi:10.1533/9780857095152.232
- [43] JANJUŠEVIĆ, Z., Z. GULIŠIJA, M. MIHAILOVIĆ a A. PATARIĆ. Effect of Tempering on Mechanical Properties and Microstructure of a High-Strength Low-Alloy Steel. *Metal Science and Heat Treatment* [online]. 2014, 56(1-2), 81-83 [cit. 2021-11-26]. ISSN 0026-0673. Dostupné z: doi:10.1007/s11041-014-9708-y
- [44] LIN, J., D. BALINT a M. PIETRZYK. *Microstructure Evolution in Metal Forming Processes*. Velká Británie: Woodhead Publishing, 2012. ISBN 978-0-85709-074-4
- [45] Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl. *Workswell* [online]. Česká Republika, 2020, 2020 [cit. 2021-11-26]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl/> (Obrázek)
- [46] WU, X. Advanced high-strength steel tailor welded blanks (AHSS-TWBs). *Tailor Welded Blanks for Advanced Manufacturing* [online]. Elsevier, 2011, 2011, 118-163 [cit. 2021-11-26]. ISBN 9781845697044. Dostupné z: doi:10.1533/9780857093851.2.118
- [47] DOEGE, Eckart, Steffen KULP a Christina SUNDERKÖTTER. Properties and application of TRIP-steel in sheet metal forming. *Steel Research* [online]. 2002, 73(6-7), 303-308 [cit. 2021-11-26]. ISSN 01774832. Dostupné z: doi:10.1002/srin.200200213
- [48] LENARD, John G. *Material Attributes. Primer on Flat Rolling* [online]. Elsevier, 2014, 2014, 163-191 [cit. 2021-11-26]. ISBN 9780080994185. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-099418-5.00008-1

- [49] MOHRBACHER, Hardy. Property Optimization in As-Quenched Martensitic Steel by Molybdenum and Niobium Alloying. *Metals* [online]. 2018, 8(4) [cit. 2021-11-26]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met8040234
- [50] GARRISON, W.M. a M.O.H. AMUDA. *Stainless Steels: Martensitic. Reference Module in Materials Science and Materials Engineering* [online]. Elsevier, 2017, 2017 [cit. 2021-11-26]. ISBN 9780128035818. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-12-803581-8.02527-3
- [51] SOLEIMANI, Maryam, Alireza KALHOR a Hamed MIRZADEH. Transformation-induced plasticity (TRIP) in advanced steels: A review. *Materials Science and Engineering: A* [online]. 2020, 795 [cit. 2021-11-26]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.140023
- [52] KOCAŇDA, A. a C. JASIŇSKI. Extended evaluation of Erichsen cupping test results by means of laser speckle. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* [online]. 2016, 16(2), 211-216 [cit. 2021-11-26]. ISSN 16449665. Dostupné z: doi:10.1016/j.acme.2015.10.007
- [53] ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály – Stanovení křivek mezní tvařitelnosti pro plechy a pásy: Část 2: Stanovení křivek mezní tvařitelnosti v laboratoři. 2. vyd. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021*
- [54] HUANG, Gang, Sriram SADAGOPAN a Hubert SCHREIER. Determination of Forming Limit and Fracture Limit Curves Using Digital Image Correlation. *SAE International Journal of Materials and Manufacturing* [online]. 2014, 7(3), 574-582 [cit. 2022-04-24]. ISSN 1946-3987. Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-0982
- [55] URIYA, Yu a Jun YANAGIMOTO. Bore-expanding test for thermosetting carbon-fiber-reinforced plastic sheets. *International Journal of Material Forming* [online]. 2017, 10(5), 823-829 [cit. 2021-11-26]. ISSN 1960-6206. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-016-1322-7
- [56] MOORE, Philippa a Geoff BOOTH. *Mechanical testing of welds. The Welding Engineers Guide to Fracture and Fatigue* [online]. Elsevier, 2015, 2015, 113-141, [cit. 2021-11-27]. ISBN 9781782423706. Dostupné z: doi:10.1533/9781782423911.2.113
- [57] ČSN EN ISO 6892-1. *Kovové materiály: Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2021*

- [58] MAHMOUD, Gouda M. a Riham S. HEGAZY. Comparison of GUM and Monte Carlo methods for the uncertainty estimation in hardness measurements. *International Journal of Metrology and Quality Engineering* [online]. 2017, 8 [cit. 2021-11-27]. ISSN 2107-6847. Dostupné z: doi:10.1051/ijmqe/2017014
- [59] Měření tvrdosti v kostce: metoda Vickers. Metalco.cz [online]. Česká Republika, 2021, 2021 [cit. 2021-11-27]. Dostupné z: <https://www.metalco.cz/mereni-tvrdosti-v-kostce-metoda-vickers/>
- [60] ČSN EN ISO 6507-1. Kovové materiály: Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda. 2. vyd. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2018
- [61] ČSN EN ISO 6508-1. Kovové materiály: Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2017
- [62] KIM, Young-Cheon, Won-Seok SONG, Jong-Heon KIM, Kug-Hwan KIM a Dongil KWON. Quantitative Characterization of Mechanical Properties using Instrumented Indentation. *Procedia Engineering* [online]. 2011, 10, 3162-3172 [cit. 2022-02-09]. ISSN 18777058. Dostupné z: doi:10.1016/j.proeng.2011.04.523
- [63] Instrumented indentation testing IIT [online]. Anton Paar, c2022 [cit. 2022-02-10]. Dostupné z: <https://wiki.anton-paar.com/en/instrumented-indentation-testing-iit/>
- [64] ČSN EN ISO 14577-1. Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda. 2. vyd. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016
- [65] OSMANI, Bekim, Tino TÖPPER, Christian DESCHENAUX, Jiri NOHAVA, Florian M. WEISS, Vanessa LEUNG a Bert MÜLLER. Micro- and nanostructured electro-active polymer actuators as smart muscles for incontinence treatment [online]. 2015, 91-100 [cit. 2022-02-11]. Dostupné z: doi:10.1063/1.4908588
- [66] HAN, Chung-Souk a Svetoslav NIKOLOV. Indentation size effects in polymers and related rotation gradients. *Journal of Materials Research* [online]. 2007, 22(6), 1662-1672 [cit. 2022-02-14]. ISSN 0884-2914. Dostupné z: doi:10.1557/JMR.2007.0197
- [67] ČSN EN 10088-2. Korozivzdorné oceli - Část 2: Technické dodací podmínky pro plechy a pásy z ocelí odolných korozi pro obecné použití. 4. vydání. Praha: Česká agentura pro standardizaci, 2015

[68] BUP Sheet Metal Testing Machines. Zwickroel [online]. Německo [cit. 2022-03-31]. Dostupné z: <https://www.zwickroell.com/products/static-materials-testing-machines/bup-sheet-metal-testing-machines/>

[69] Micro Combi Tester: MCT³. Anton-paar [online]. [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: https://www.anton-paar.com/corp-en/products/details/micro-combi-tester-mct3/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=HQ_BC.MSC.SCRATCH_EN&utm_content=C00049248&gclid=CjwKCAjwxZqSBhAHEiwASr9n9Af0WLcQspa201nZY3bprWtfyCr8Z1ZYLOXh7KOpoUfxOIuJTMY7-xoCEekQAvD_BwE

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

α	úhel ohybu (opásání) plechu na tažné hraně [°]
α	koeficient pro použití přidržovače [-]
ΔL	prodloužení [mm]
ε	poměrné prodloužení [-]
η_{IT}	poměr elastické a plastické práce [%]
μ	součinitel tření [-]
μm	mikrometr
ν	Poissonův poměr [-]
π	Ludolfovo číslo Pi [-]
σ	velikost napětí [MPa]
σ_1	velikost napětí [MPa]
σ_2	velikost napětí [MPa]
σ_3	velikost napětí [MPa]
σ_o	napětí vyvolané ohybem přístříhu na zaoblené hraně tažnice, $2\sigma_o$ značí dvojí ohyb (ohyb a narovnání) [MPa]
σ_{tr}	napětí vyvolané třením od tlaku přidržovače na zesilující se okraj přístříhu [MPa]
σ_v	výsledné tahové napětí [MPa]
φ	průběh logaritmické deformace [-]
%	procento
°	stupeň
°C	stupeň Celsia
A	tažnost materiálu [%]
$A_{[Re(\alpha)]}$	plošná anizotropie [-]
$A_p(h_c)$	průmět kontaktní plochy vnikacího tělesa ve vzdálenosti h_c od hrotu [mm ²]
bcc	body centered cubic - krychlová plošně centrovaná mřížka

BH	bake hardenable steel - typ vysoko pevnostní oceli
c	součinitel vyjadřující vliv součinitele tažení m s přihlédnutím k poměrné tloušťce s_0/D_0 [-]
C	množství uhlíku [%]
C_{IT}	vtiskové tečení [%]
CP	complex phase - označení nízkouhlíkové oceli pro automobilový průmysl
C_s	kontaktní poddajnost po korekci poddajnosti stroje [nm/mN]
d	průměr tažníku [mm]
d	průměr výtažku [mm]
d_{max}	horní mez průměru otvoru po tažení [mm]
d_{min}	dolní mez průměru otvoru po tažení [mm]
d_n	průměr výtažku po x tažení [mm]
D_0	počáteční průměr přístříhu [mm]
D_r	průměr rondelu [mm]
DP	dual phase - dvoufázové oceli
DSI	depth sensing indentation – instrumentovaná zkouška tvrdosti
$e^{\mu,\alpha}$	součinitel vyjadřující vliv tření na zaoblené hraně tažnice [-]
E	modul pružnosti v tahu [MPa]
E^*	modul rovinné deformace [MPa]
E_{IT}	vtiskový modul zkušebního tělesa [MPa]
E_r	redukovaný modul rovinné deformace kontaktu [MPa]
fcc	face centered cubic - krychlová plošně středěná mřížka
F	zatěžující síla [N]
F_e	síla na mezi kluzu [N]
F_p	síla přidržovače [N]
$F_{taž}$	tažná síla [N]

FLD	forming limit diagram – limitní diagram tváritelnosti
h	hodina
h	minimální výška výtažku [mm]
h	trvalá hloubka vtisku po odlehčení F_1 při zachování předběžného zatížení F_0 [mm]
h_1	hloubka vtisku v čase (t_1), kdy je dosaženo zkušebního zatížení, které je udržováno na konstantní úrovni [mm]
h_2	hloubka vtisku v čase (t_2) výdrže na konstantní úrovni zkušebního zatížení [mm]
hcp	hexagonal close packed - šesterečná mřížka
H_{IT}	vtisková tvrdost [MPa]
HM	tvrdost podle Martense [MPa]
HR	Hardness Rockwell - tvrdost dle Rockwella
HSLA	high strength low alloy - vysokopevnostní nízkolegované oceli
HV	Vickers hardness - tvrdost podle Vickerse
IF	interstitial free - označení nízkopevností oceli
IF – HS	interstitial free - high strength steel - označení vysokopevností oceli
IF – Ti	interstitial free + titan - nízkopevností ocel s příměsí titanu
kg	kilogram
K	stupeň tažení [-]
K_s	součinitel ztenčení tloušťky stěn výtažku [%]
L	výška plechu [mm]
L_1	délka vzorku po přetržení [mm]
L_2	počáteční délka vzorku [mm]
LDH	limiting dome height - limitní výška výtažku
m	poměr průměru výtažku d k počátečnímu průměru přístřihu D_0 [-]
m	součinitel tažení [-]
m_n	celkový součinitel tažení [-]

mm	jednotka milimetr
MS	martensitic steel - martenzitická ocel
MPa	jednotka megapascal
n	nerovnoměrnost deformace [-]
nJ	jednotka nano-Joule
N	konstanta celkového rozsahu charakterizující stupnici [-]
N	jednotka Newton
p	měrný přidržovací tlak [MPa]
r_e	redukovaný poloměr přístřihu [mm]
r_i	poloměr zaoblení výtažku [mm]
$R_{(\alpha)}$	normálová anizotropie [-]
R_e	mez kluzu [MPa]
R_{te}	poloměr tažnice [mm]
s	jednotka sekunda
s_n	plocha příčného průřezu po n-té operaci [mm ²]
s_0	počáteční plocha průřezu tyče [mm ²]
s_0	výchozí tloušťka plechu [mm]
S	konstanta stupnice [mm]
S_1	průřez vzorku po přetržení [mm ²]
S_2	počáteční průřez vzorku [mm ²]
S_c	činná (funkční) plocha pod přidržovačem [mm ²]
t	hodnota hloubky tažení [mm]
t_m	tažná mezera [mm]
TRIP	transformation induced plasticity - oceli s transformačně indukovanou plasticitou
TWIP	twinning induced plasticity - oceli s indukovanou plasticitou
u	průměrná délka uhlopříčky vtisku [mm]

W_{elast} elastická zpětná deformační práce vnikacího procesu [pJ]

W_{plast} plastická deformační práce vnikacího procesu [pJ]

W_{total} celková mechanická práce vnikacího procesu [pJ]

z materiálová konstanta [-]

Z zúžení materiálu (kontrakce) [%]

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1 – Krystalové mřížky kovů [3].....</i>	15
<i>Obr. 2 – Pracovní diagram zkoušky tahem a tlakem pro měkkou uhlíkovou ocel [5].....</i>	17
<i>Obr. 3 - Plastické deformace skluzem při zatížení napětím [6].....</i>	18
<i>Obr. 4 – Skluzové systémy pro nejhustěji osazené roviny; a) BCC mřížky, b) FCC mřížka, c) HCP mřížka [7].....</i>	18
<i>Obr. 5 – Mechanismus dvojčatění mřížky FCC [6].....</i>	19
<i>Obr. 6 – Změna tvaru zrn před a po tváření za studena [8].....</i>	20
<i>Obr. 7 – Pás teplot pro tváření za studena u uhlíkových ocelí [9].....</i>	21
<i>Obr. 8 – Hluboké tažení plechů [17].....</i>	24
<i>Obr. 9 – Tažení válcového výtažku; a) – schéma nástroje; b) – hlavní napětí ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) a deformace ($\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$); c) – průběh logaritmické deformace ($\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$) [16].....</i>	25
<i>Obr. 10 – Průběh tažné síly [17].....</i>	27
<i>Obr. 11 – Vybrané hodnoty součinitele c [16].....</i>	27
<i>Obr. 12 – Technologické způsoby tažení [19].....</i>	28
<i>Obr. 13 – Tažnice - a) hrana tažnice s velkým zaoblením, b) hrana tažnice vytvořená evolventní křivkou místo ostré hrany tažnice [16].....</i>	30
<i>Obr. 14 – Provedení otvoru tažnice [20].....</i>	31
<i>Obr. 15 – 2. tažení pro průměr výtažku větší než 60 mm [16].....</i>	31
<i>Obr. 16 – Schéma tažení válcového výtažku na 3 operace [16].....</i>	32
<i>Obr. 17 – Tažení se ztenčením stěny [21].....</i>	34
<i>Obr. 18 – Porovnání napětí a) válcového výtažku, b) nerotačního výtažku; c) zobrazení deformace sítě v rozích nerotační čtvercové nádoby [18].....</i>	34
<i>Obr. 19 – Návrh přístřihu s následným porovnáním výtažků; a) optimální přístřih; b) špatně navržený přístřih (vznik defektů) [22].....</i>	35
<i>Obr. 20 – a) obdélníkový průřez způsobí vznik cípů v rozích; b) správný tvar přístřihu plechu [19].....</i>	35
<i>Obr. 21 – Tažná mezera pro čtyřhranný výtažek [23].....</i>	36
<i>Obr. 22 – Forma pro hluboké tažení [24].....</i>	37
<i>Obr. 23 – Úprava tvárnice pro variabilitu procesu [24].....</i>	37
<i>Obr. 24 – Nástroje pro jednodušší aplikace hlubokého tažení [25].....</i>	38
<i>Obr. 25 – Způsob výroby hybridních nástrojů [27].....</i>	38
<i>Obr. 26 – Jednočinný hydraulický lis s pomocným hydraulickým válcem [21].....</i>	39
<i>Obr. 27 – a) tvarová brzda v tažnici; b) brzdící žebra [21].....</i>	40
<i>Obr. 28 – Teoretický tvar brzdícího žebra [29].....</i>	40
<i>Obr. 29 – vlny na výtažku [19].....</i>	42

<i>Obr. 30 – Základní defekty hlubokého tažení plechů; a) vlnění v přírubě; b) vlnění na stěně; c) roztržení; d) earing; e) poškrábání povrchu [33]</i>	43
<i>Obr. 31 – Struktura IF oceli [37]</i>	45
<i>Obr. 32 – Princip zvýšení meze kluzu pomocí tepelného zpracování [41]</i>	47
<i>Obr. 33 – Mikrostruktura HSLA oceli po temperování po dobu 24h při teplotě: a) 450 °C; b) 550 °C; c) 650 °C [43]</i>	47
<i>Obr. 34 – Mikrostruktura DP ocelí [45]</i>	48
<i>Obr. 35 – Mikrostruktura CP oceli (HDT780C) [45]</i>	48
<i>Obr. 36 – Mikrostruktura TRIP oceli [45]</i>	49
<i>Obr. 37 – Mikrostruktura TWIP oceli [45]</i>	49
<i>Obr. 38 – Mikrostruktura martenzitu [45]</i>	50
<i>Obr. 39 – Graf závislosti pevnosti v tahu a tažnosti pro běžně používané oceli [51]</i>	51
<i>Obr. 40 – Schéma zkoušky hluboko tažnosti; a) hlubokotažný plech, b) nevhodný plech pro hluboké tažení [16]</i>	53
<i>Obr. 41 – Křivka mezní tvářitelnosti FLC [54]</i>	54
<i>Obr. 42 – Zkušební těleso pro zjištění FLC křivek [53]</i>	54
<i>Obr. 43 – Základní schéma zkoušky LDH (Nakajima) [53]</i>	55
<i>Obr. 44 – Zkouška dle Siebela a Pompa [16]</i>	56
<i>Obr. 45 – Schéma zkoušky dle Vickerse [58]</i>	58
<i>Obr. 46 – Polohy vtisků pro zkoušku tvrdosti dle Vickerse [60]</i>	59
<i>Obr. 47 – Indentační křivka měření tvrdosti podle DSI metody [64]</i>	60
<i>Obr. 48 – Schéma zkoušky pomocí metody DSI [64]</i>	61
<i>Obr. 49 – Způsob zápisu tiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu DSI [64]</i>	62
<i>Obr. 50 – Znázornění vtiskového tečení [64]</i>	64
<i>Obr. 51 – Plastická a elastická část vnikacího procesu [66]</i>	65
<i>Obr. 52 – Tloušťka plechů z oceli 1.4376 (zleva tloušťka 3 mm, 1,5 mm a 1 mm)</i>	70
<i>Obr. 53 – 3D model výtažku v programu NX (Erichsen 28 mm)</i>	71
<i>Obr. 54 – Import dílu s nastavením symetrie a směru tváření pro metodu LDH a tloušťce plechu 3 mm</i>	72
<i>Obr. 55 – Volba materiálu HCT690T v programu AutoForm R8</i>	73
<i>Obr. 56 – Výrobní plán pro hluboké tažení plechu</i>	74
<i>Obr. 57 – Přidržovač plechu pro hluboké tažení</i>	74
<i>Obr. 58 – Konstrukční úprava tažníku</i>	75
<i>Obr. 59 – Geometrie zaoblení tažníku</i>	75
<i>Obr. 60 – Definice přístřihu plechu</i>	76
<i>Obr. 61 – Geometrie brzdícího elementu</i>	76

<i>Obr. 62 – Nastavení brzdících elementů</i>	77
<i>Obr. 63 – Brzda v prostředí programu AutoForm R8</i>	77
<i>Obr. 64 – Popis oblastí FLD diagramu</i>	78
<i>Obr. 65 – FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E20TL1,5</i>	79
<i>Obr. 66 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E20TL1</i>	80
<i>Obr. 67 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E28TL1,5</i>	80
<i>Obr. 68 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení - E28TL1</i>	81
<i>Obr. 69 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL3</i>	81
<i>Obr. 70 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL1,5</i>	82
<i>Obr. 71 - FLD diagram s vizualizací procesu hlubokého tažení – LDH70,2TL1</i>	82
<i>Obr. 72 – Stupnice maximálního porušení</i>	83
<i>Obr. 73 – Maximální porušení výtažku (E20TL1,5)</i>	83
<i>Obr. 74 - Maximální porušení výtažku (E20TL1)</i>	84
<i>Obr. 75 - Maximální porušení výtažku (E28TL1,5)</i>	84
<i>Obr. 76 - Maximální porušení výtažku (E28TL1)</i>	85
<i>Obr. 77 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL3)</i>	85
<i>Obr. 78 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL1,5)</i>	86
<i>Obr. 79 - Maximální porušení výtažku (LDH70,2TL1)</i>	86
<i>Obr. 80 – Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E20TL1,5)</i>	87
<i>Obr. 81 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E20TL1)</i>	88
<i>Obr. 82 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E28TL1,5)</i>	88
<i>Obr. 83 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (E28TL1)</i>	89
<i>Obr. 84 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL3)</i>	89
<i>Obr. 85 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL1,5)</i>	90
<i>Obr. 86 - Ztenčení tloušťky stěny výtažku (LDH70,2TL1)</i>	90
<i>Obr. 87 – Plech materiálu 1.4376</i>	91
<i>Obr. 88 – Zařízení BUP-600 pro zkoušku tažení plechu</i>	93
<i>Obr. 89 – výtažky plechů materiálu 1.4376 pro jednotlivé tloušťky plechů</i>	94
<i>Obr. 90 – Závislost zatěžující síly tažníku na vzdálenosti tažení pro plech tloušťky 1,5 mm</i>	95
<i>Obr. 91 – Nastavené parametry zařízení BUP-600</i>	96
<i>Obr. 92 – Preparace výtažků plechu</i>	97
<i>Obr. 93 – Lineární přesná pila IsoMet 4000</i>	97
<i>Obr. 94 – Příprava vzorku s uvážením měřených míst (ERICHSEN)</i>	98
<i>Obr. 95 - Příprava vzorku s uvážením měřených míst (LDH)</i>	99

<i>Obr. 96 – Znázornění řezů pro přípravu preparátů plechů.....</i>	<i>99</i>
<i>Obr. 97 – Automatický lis SimpliMet 1000 s práškovou pryskyřicí PhenoCure</i>	<i>100</i>
<i>Obr. 98 – Vybroušené vzorky obsahující preparáty plechů.....</i>	<i>101</i>
<i>Obr. 99 – Zařízení na broušení metalografických vzorků (EcoMet 250 Pro)</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 100 – Měřené oblasti pro zkoušku hlubokotažnosti podle Erichsena</i>	<i>103</i>
<i>Obr. 101 - Měřené oblasti pro zkoušku hluboko-tažnosti LDH.....</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 102 – Mikro-kombinovaný tester MCT³</i>	<i>104</i>
<i>Obr. 103 – Technické specifikace mikro-kombinovaného testeru MCT³ [69]</i>	<i>105</i>
<i>Obr. 104 - Nalezení měřeného místa pod mikroskopem (E20TL1)</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 105 – Snímek mikroskopu v prostředí programu CSM (E20TL1).....</i>	<i>106</i>
<i>Obr. 106 – Zjištění výšky povrchu automatickou indetací pro zatížení 0,01 N.</i>	<i>107</i>
<i>Obr. 107 – Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu LDH.....</i>	<i>109</i>
<i>Obr. 108 – Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu podle Erichsen (tažník 28 mm).....</i>	<i>110</i>
<i>Obr. 109 - Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} pro metodu podle Erichsen (tažník 20 mm)</i>	<i>111</i>
<i>Obr. 110 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu LDH.....</i>	<i>112</i>
<i>Obr. 111 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu Erichsen (28 mm)</i>	<i>113</i>
<i>Obr. 112 - Graf mikro tvrdosti podle Vickerse H_{VIT} pro metodu Erichsen (20 mm)</i>	<i>114</i>
<i>Obr. 113 – Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu LDH.....</i>	<i>115</i>
<i>Obr. 114 - Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu Erichsen (28 mm).....</i>	<i>116</i>
<i>Obr. 115 - Graf vtiskového modulu pružnosti E_{IT} pro metodu Erichsen (20 mm).....</i>	<i>117</i>
<i>Obr. 116 – Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu LDH</i>	<i>118</i>
<i>Obr. 117 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu LDH.....</i>	<i>119</i>
<i>Obr. 118 - Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (28 mm) .</i>	<i>120</i>
<i>Obr. 119 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (28 mm) .</i>	<i>121</i>
<i>Obr. 120 - Graf elastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (20 mm) .</i>	<i>122</i>
<i>Obr. 121 - Graf plastické části práce vnikacího procesu pro metodu Erichsen (20 mm) .</i>	<i>123</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1 – Porovnání mechanických vlastností IF ocelí [38]</i>	<i>46</i>
<i>Tab. 2 – Rozsah zatížení pro zkoušku mikro a makro-tvrlosti dle Vickerse [61].....</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 3 – Chemické složení oceli 1.4376 [67].....</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 4 – Vybrané mechanické vlastnosti materiálu 1.4376 [67]</i>	<i>69</i>
<i>Tab. 5 – Vybrané tloušťky plechu</i>	<i>70</i>
<i>Tab. 6 – Parametry zařízení BUP-600 [68].....</i>	<i>92</i>
<i>Tab. 7 – Využití testovacích metod hlubokého tažení</i>	<i>93</i>
<i>Tab. 8 – Porovnání získaných parametrů zkoušek pro plechy tloušťky 1,5 mm.....</i>	<i>94</i>
<i>Tab. 9 – Nastavení parametrů indentace.....</i>	<i>107</i>