

Výroba plechového dílu technologií hlubokého tažení a vliv této technologie na mechanické vlastnosti

Bc. Tomáš Novosad

Diplomová práce
2023



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická
Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Tomáš Novosad
Osobní číslo:	T21426
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Výroba plechového dílu technologií hlubokého tažení a vliv této technologie 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: **doc. Ing. Martin Ovsík, Ph.D.**
Ústav výrobního inženýrství

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **12. května 2023**

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

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 7. února 2023

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: Tomáš Novosad

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá hlubokým tažením plechů a následným měřením změny mechanických vlastností vlivem procesu tažení. Práce je rozdělena do dvou částí. V první, teoretické části se pojednává o procesu tváření, materiálech vhodných k plošnému tváření, technologických a mechanických zkouškách, tepelném zpracování a simulacích procesu tváření. Praktická část je věnována volbě plechů různých tloušťek a různých materiálů, tažení vzorků na zařízení BUP 600, měření změny mechanických vlastností vlivem procesu hlubokého tažení a vyhodnocení těchto změn. Dále se zabývá tvorbou simulací v softwaru AutoForm R8, které slouží k porovnání výsledků simulací a reálných výsledků.

Klíčová slova: tváření, hluboké tažení, simulace, AutoForm, FLD diagram, Erichsen, Nakajima, mikrotvrdost, Vickers

ABSTRACT

This thesis deals with the deep drawing of sheet metal and the subsequent measurement of the change in mechanical properties due to the drawing process. The thesis is divided into two parts. The first, theoretical part deals with the forming process, materials suitable for sheet forming, technological and mechanical tests, heat treatment and simulations of the forming process. The practical part is devoted to the selection of sheets of different thicknesses and materials, drawing of specimens on the BUP 600, measurement of changes in mechanical properties due to the deep drawing process and evaluation of these changes. It also deals with the creation of simulations in AutoForm R8 software, which are used to compare the results of simulations and real results.

Keywords: forming, deep drawing, simulation, AutoForm, FLD diagram, Erichsen, Nakajima, microhardness, Vickers

Tímto bych chtěl poděkovat mému vedoucímu práce panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za čas strávený nad touto prací, odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi při tvorbě této diplomové práce dal.

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

OBSAH

ÚVOD.....	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 TVÁŘENÍ.....	12
1.1 ROZDĚLENÍ TVÁŘENÍ	12
1.2 TVÁŘENÍ ZA STUDENA	12
1.3 TVÁŘENÍ ZA TEPLA	13
1.4 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ.....	13
1.4.1 Kování	13
1.4.2 Válcování	14
1.4.3 Tažení drátů a profilů	15
1.4.4 Protlačování.....	15
1.5 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	15
1.5.1 Stříhání	16
1.5.2 Ohýbání	17
1.5.3 Tažení	18
2 MATERIÁL VHODNÝ K PLOŠNÉMU TVÁŘENÍ.....	25
2.1 VLASTNOSTI MATERIÁLU	25
2.2 KVALITA A ROZMĚROVÁ PŘESNOST PLECHŮ.....	26
2.3 DRUHY OCELÍ.....	26
2.3.1 Nízkopevnostní oceli.....	27
2.3.2 Vysokopevnostní oceli	28
2.3.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli.....	29
3 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY.....	33
3.1 ZKOUŠKA HLOUBENÍM PODLE ERICHSENA	33
3.2 ZKOUŠKA KALÍŠKOVACÍ.....	34
3.3 ZKOUŠKA PODLE ENGELHARDTA – GROSSE	35
3.4 ZKOUŠKA ROZŠÍŘOVÁNÍM OTVORU PODLE SIEBELA A POMPA.....	37
3.5 ZKOUŠKA TAŽENÍM V KUŽELOVÉ TAŽNICI	38
3.6 ZKOUŠKA HYDRAULICKÁ	39
4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY.....	40
4.1 ZKOUŠKA TVRDOSTI.....	40
4.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	40
4.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	41
4.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella	42
4.1.4 Zkoušky mikrotvrdomosti	42
5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ	44
5.1 ŽÍHÁNÍ	44

5.1.1	Normalizační žihání	45
5.1.2	Žihání na měkko.....	45
5.1.3	Rekrystalizační žihání	45
5.1.4	Žihání ke snížení pnutí	46
6	SIMULOVÁNÍ PROCESU TVÁŘENÍ.....	47
6.1	ANALÝZA.....	47
6.2	VÝSLEDKY ANALÝZ	48
6.2.1	Lisovatelnost (Formability).....	48
6.2.2	Porušení (Max Failure)	51
6.2.3	Zvlnění (Wrinkling)	52
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	54
7	STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE	55
8	VOLBA PLECHŮ	56
8.1	MATERIÁL.....	56
8.1.1	Materiál DC03.....	56
8.1.2	Materiál 1.4306	57
9	VÝROBA DÍLŮ HLUBOKÝM TAŽENÍM	58
9.1	BUP 600	58
9.2	TAŽENÉ VZORKY	59
9.2.1	Metoda podle Erichsena	60
9.2.2	Metoda Nakajima	64
10	SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ.....	68
10.1	NASTAVENÍ SIMULACÍ	68
10.1.1	Model součásti	68
10.1.2	Import součásti	68
10.1.3	Zorientování dílu	69
10.1.4	Přiřazení materiálu	69
10.1.5	Výrobní plán.....	70
10.1.6	Tažník a přidržovač.....	71
10.1.7	Přístřih plechu	72
10.1.8	Brzdící drážka	72
10.2	VÝSLEDKY SIMULACÍ	73
10.2.1	Tvářitelnost (FLD)	73
10.2.2	Porušení (Max failure)	82
10.2.3	Ztenčení (Thinning)	84
11	PŘÍPRAVA VZORKŮ.....	87
11.1	ŘEZÁNÍ VZORKŮ.....	87
11.2	ZALISOVÁNÍ VZORKŮ	88
11.3	BROUŠENÍ VZORKŮ.....	88
12	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	90

12.1	MĚŘENÉ OBLASTI PRO METODU PODLE ERICHSENA.....	90
12.2	MĚŘENÉ OBLASTI PRO METODU NAKAJIMA.....	91
12.3	MICKO-COMBI TESTER	91
12.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	92
12.4.1	Mikrotvrdost podle Vickerse HV_{IT}	92
12.4.2	Vtiskový modul pružnosti E_{IT}	95
12.4.3	Elastická práce W_{ELAST}	98
12.4.4	Plastická práce W_{PLAST}	101
13	DISKUZE VÝSLEDKŮ	104
	ZÁVĚR	106
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	107
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	112
	SEZNAM OBRÁZKŮ	114
	SEZNAM TABULEK.....	118

ÚVOD

Technologií hlubokého tažení lze vyrábět velké množství výrobků různých tvarů a velikostí. Díky těmto vlastnostem se využívá téměř ve všech oblastech výroby. Největší využití však nachází v automobilovém průmyslu, kde se hlubokým tažením vyrábí celá řada dílů, jako například jednotlivé díly karoserie, rám autosedaček atd. Mezi hlavní výhody hlubokého tažení patří úspora materiálu a nízké výrobní časy.

Samotný proces probíhá na složitých lisech a tvarovacích zařízeních, které umožňují provádět více operací na jednom zařízení. Tyto operace probíhají v určité posloupnosti podle potřeby. Mezi tyto operace patří samotné hluboké tažení, vystřihování děr, ostřihování okrajů a ohýbání. Hluboké tažení je prováděno pomocí tažníku, tažnice a přídržovače, který však nemusí být vždy využit. Kvalita tažných nástrojů se odráží v kvalitě vytažených dílů.

Proces hluboké tažení je ovlivněn velkým množstvím faktorů. Proto v poslední době nastal velký rozvoj počítačových programů pro simulování tvářecích procesů. Tyto softwary jsou v oblasti zpracování plechů v současné době pro průmysl velmi důležitým nástrojem, který umožňuje na základě zvolených procesních parametrů přesně předpovídat geometrické vlastnosti dílů a charakteristiky po tváření (např. zbytkové napětí) a možné vady a poruchy. Díky těmto předpovědím se dělají zásadní rozhodnutí při návrhu procesu, která silně ovlivňují technický a ekonomický úspěch procesu, jako je výběr vhodného technologického postupu, návrh nástrojů a jejich řízení.

Kvůli ekologickým a bezpečnostním normám provádí automobilový průmysl vývoj nových materiálů s lepším poměrem pevnosti k hmotnosti. Nově zavedené materiály umožňují vyrábět komponenty z tenčích plechů při zachování uspokojivé pevnosti a tuhosti, což v konečném důsledku vede ke snížení hmotnosti konstrukce, což je zásadní krok ke splnění stále přísnějších norem bezpečnosti cestujících a emisí.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TVÁŘENÍ

Tváření je technologie mechanického zpracování kovů a slitin kovů, při kterém za působení vnějších sil dochází ke změně tvaru polotovaru bez porušení celistvosti materiálu, tudíž nedochází k odběru třísky. V materiálu dochází pouze k trvalému přesunu hmoty, a to pomocí působení statických nebo rázových sil.

Tváření patří k nejproduktivnějším technologiím pro zpracování kovů. Tato metoda je velmi produktivní, hospodárná a přesná. Díky těmto vlastnostem lze vyrábět vyměnitelné výrobky s minimálním odpadem. V porovnání s obráběním, u kterého se odpad pohybuje okolo 40 % u technologie tváření je mezi 5 až 10 %. Další výhodou tváření je snadná mechanizace a automatizace, což vede ke snížení výrobních nákladů. Technologie nachází využití při výrobě hutních a strojních polotovarů, ale i při výrobě konečných výrobků ve většině odvětvích strojírenské výroby. [1]

1.1 Rozdělení tváření

Na technologii tváření má největší vliv výběr vhodného materiálu s velkou plasticitou. Mezi další rozhodující podmínky patří teplota, rychlost a velikost deformace, stav napjatosti, chemické složení a fyzikální vlastnosti materiálu. Podle těchto podmínek se tváření rozděluje na tváření za tepla a za studena a na tváření objemové a plošné. [1, 2]

1.2 Tváření za studena

Při tváření za studena dochází ke změně tvaru působením deformačních sil, kdy materiál má teplotu nižší, než je teplota rekrytalizační. Při tomto procesu se zvyšuje vnitřní pnutí v materiálu, což způsobuje zpevnění materiálu. Zrna materiálu se prodlužují a orientují ve směru deformace. Tato změna struktury materiálu má za následek zvýšení pevnosti a tvrdosti materiálu a zároveň snížení tvárnosti a vrubové houževnatosti. Omezující podmínkou u tváření za studena je maximální hranice deformace, za kterou dochází k prasknutí materiálu. Pokud potřebujeme dosáhnout velkých deformací, tváření se rozdělí na více stupňů, kdy mezi jednotlivé stupně zařadíme teplotní zpracování na snížení vnitřního pnutí tzv. zotavení.

Výhodou tváření za studena je docílení vysoké přesnosti rozměrů, zlepšení mechanických vlastností díky zpevnění a vysoká kvalita povrchu na kterou má vliv proces samotný, protože na rozdíl od tváření za tepla nevznikají okuje. Nevýhodou potom je potřeba vysokých tvářecích sil a omezená tvářitelnost materiálu. [3, 4]

1.3 Tvářením za tepla

K tvářením za tepla dochází, pokud je materiál ohřátý nad rekrytalizační teplotu. Ohřevem materiálu se zmenšuje pevnost a tvrdost, ale zlepšuje se tvárnost, proto v porovnání s tvářením za studena je zapotřebí mnohem menších tvářecích sil. Vlivem teplot zároveň dochází ke vzniku okují, které způsobují nekvalitní povrch a ztráty materiálů, proto je snaha provádět tvářením s co nejmenším počtem ohřevů. Z těchto důvodů je důležitá volba správné tvářecí teploty, která je ohraničená horní a dolní tvářecí teplotou. [1, 4]

1.4 Objemové tvářením

Mezi objemové tvářením patří kování, válcování, tažení drátů a profilů a protlačování. U těchto technologií nastává deformace ve všech třech směrech souřadného systému. [2, 5]

1.4.1 Kování

Kováním řadíme mezi objemové tvářením za tepla, které je prováděno dynamickou nebo statickou silou působící na předeřtý polotovár. Výrobek, který vznikne technologií kování nazýváme výkovek. Kování můžeme rozdělit na volné a zápustkové.

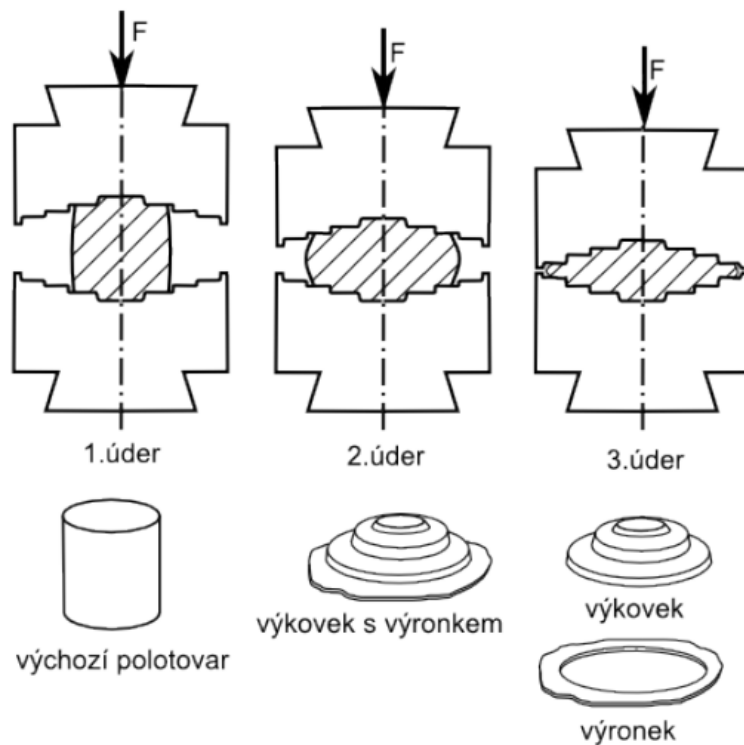
Volné kování

Volné kování se provádí úderem na polotovár, při kterých dochází k volné změně tvaru materiálu mezi kovacími nástroji. V případě ručního volného kování se využívá kladiva a kovádky a v případě strojního volného kování se používají lisu a buchary.

Zápustkové kování

Na rozdíl od volného kování se zápustkové kování používá k výrobě velkého počtu součástí. Zápustka je většinou dvoudílný nástroj, který má tvar dutiny totožný s tvarem výkovku. Rozměry jsou zvětšeny o smrštění, které nastane po vychladnutí výkovku. Výhodou zápustkového kování je vysoká výkonost a snadná obsluha, ale nevýhodou je omezení v rozměrech a hmotnosti výkovku.

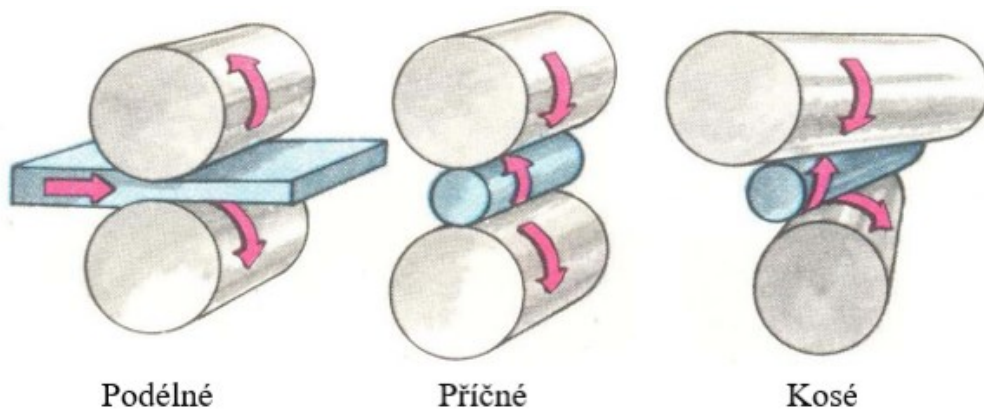
Při zápustkovém kování se ohřátý polotovár vloží do dutiny zápustky. K tvářením dochází rázy nebo statickým tlakem tvářecího stroje. V případě tvářením pomocí rázů se používají buchary a v případě tvářením pomocí tlaku se se využívá lisu. [1, 2, 4, 5]



Obr. 1. Zápustkové kování [4]

1.4.2 Válcování

Válcování je kontinuální proces, při kterém je materiál tvářen mezi rotujícími válci. Materiál se mezi válci deformuje tak, že se jeho výška zmenšuje a délka a šířka zvětšuje. Výrobek, který je vyroben technologií válcování nazýváme vývalek. Podle uložení os válců se válcování dělí na podélné, příčné a kosé. Dále se válce mohou dělit na hladké a kalibrované. Podélným válcováním se vyrábějí dlouhé polotovary jako tyče, kolejnice, profily, aj. Příčné válcování se využívá např. k výrobě osazených hřídelů. A kosým válcováním se vyrábějí např. trubky. [5, 6]



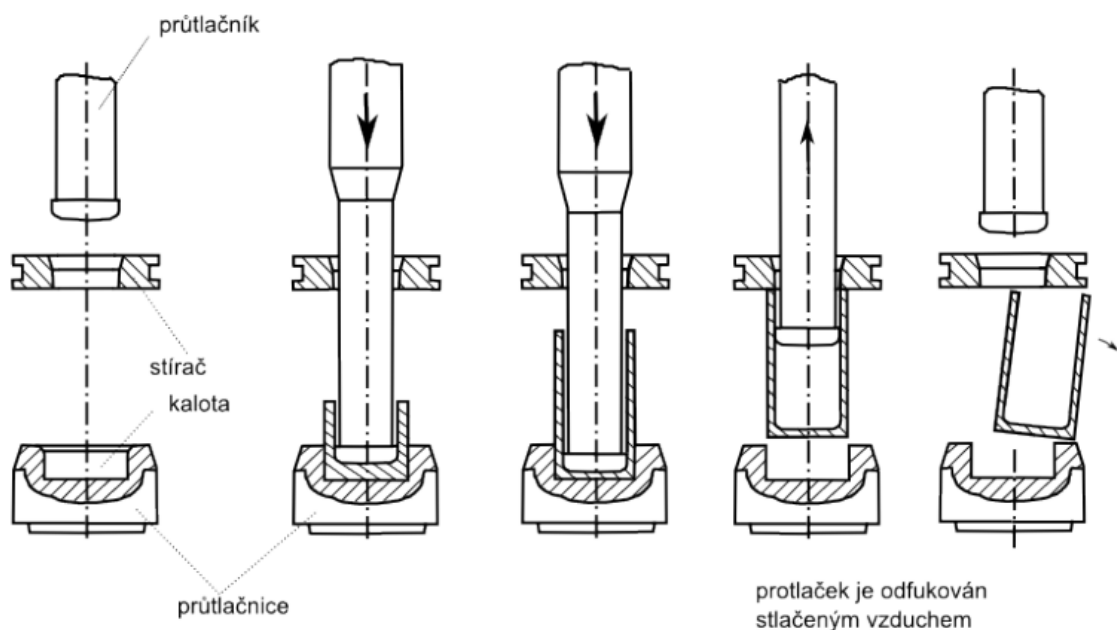
Obr. 2. Válcování [5]

1.4.3 Tažení drátů a profilů

Principem tažení je protahování polotovaru průvlakem, při kterém dochází k zmenšení průřezu a zvětšení délky. Technologií se dosahuje velmi přesných rozměrů a tvarů, zároveň se zlepšuje jakost povrchu a mechanické vlastnosti materiálu. Ke snížení tření mezi materiálem a průvlakem se používá mazivo, které odvádí teplo a zajišťuje hladký povrch výtažku. Stroje určené k této technologii se nazývají tažné stolice. [1, 4]

1.4.4 Protlačování

Protlačování je technologie tváření, která se provádí za tepla nebo za studena. Materiál je přetvářen pomocí síly, kterou vyvolává průtláčnick a směr přetvoření je dán tvarem průtláčnice. Takto vyrobený výrobek se nazývá protlaček. Protlačováním dosahujeme velmi vysoké přesnosti a zároveň vysokého využití materiálu 90 až 100 %. Podle směru se protlačování dělí na dopředné, zpětné, kombinované, stranové a radiální. [1, 4, 7]



Obr. 3. Princip protlačování [4]

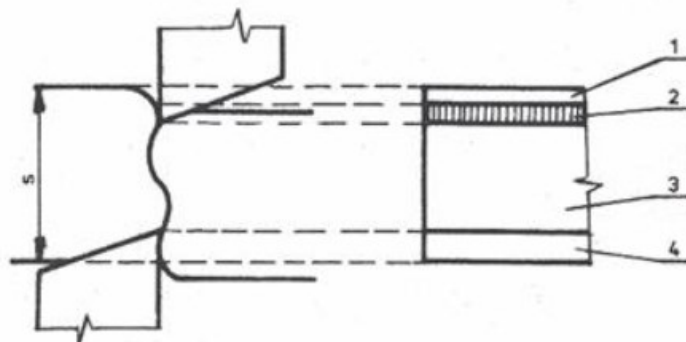
1.5 Plošné tváření

Mezi plošné tváření patří stříhání, ohýbání a tažení. U těchto technologií převládají deformace ve dvou směrech souřadného systému. [2, 5]

1.5.1 Stříhání

Technologie stříhání je nejpoužívanější v oblasti plošného tváření. Využití nachází jak při přípravě polotovarů, tak i k výrobě finálních součástí, případně součástí určených k dalšímu zpracování jako např. ohýbání, tažení atd. Kromě klasického stříhání sem řadíme i ostatní technologie určené k odstraňování materiálu jako jsou děrování, vystřihování, ostřihování aj.

Principem stříhání je způsobení smykového napětí ve střižné rovině pomocí dvou protilehlých střižných hran. Stříhání probíhá ve třech fázích. V první fázi dochází k pružné deformaci, kdy se materiál stlačuje a ohýbá. V druhé fázi se materiál dostává do oblasti plastických deformací, kdy se střižník vtlačuje do materiálu a materiál do otvoru střižnice. Ve třetí fázi začínají vznikat trhliny, které se rozšiřují až do doby kdy dojde k utržení materiálu. Toto odtržení zapříčí to, že se materiál oddělí dříve, než střižník projde celou tloušťkou materiálu. Z těchto důvodů není dosaženo zcela rovinné střižné plochy a zároveň se drsnost plochy postupně mění. [4, 7, 8]



Obr. 4. Deformační pásma při stříhání [5]

1 – pásmo elastické deformace, 2 – pásmo utržení, 3 – pásmo plastické deformace, 4 – pásmo odtlačení

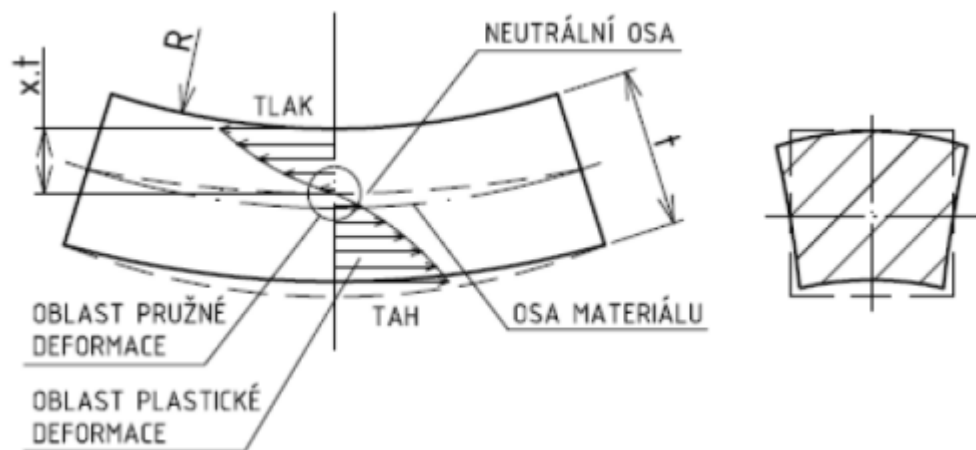
Stříhání se podle konstrukce střižníků dělí na stříhání rovnoběžnými noži, skloněnými noži, kotoučovými noži a noži na profily a tyče. Výhodou stříhání skloněnými nože je postupné stříhání materiálu, to má za následek zmenšení potřebné střižné síly oproti stříhání rovnoběžnými noži. Stříhání kruhovými noži se využívá ke stříhání dlouhých pásů. Nástrojem jsou odvalující se nože kruhového průřezu. Využití této technologie prodlužuje čas procesu, ale snižuje rázy, které vznikají při klasickém stříhání. Při stříhání profilů a tyčí je snaha dodržet zásadu, aby tloušťka stříhaného materiálu byla konstantní v každém

okamžiku stříhu. Proto se pro tento účel vyvíjejí tvarové nože, aby byla tato zásada dodržena. [1, 4]

1.5.2 Ohýbání

Během procesu ohýbání deformuje polotovár do požadovaného úhlu ohybu s požadovaným zaoblením hrany. K těmto procesům využíváme nástroje zvané ohýbadla, které se skládají z ohybníku a ohybnice.

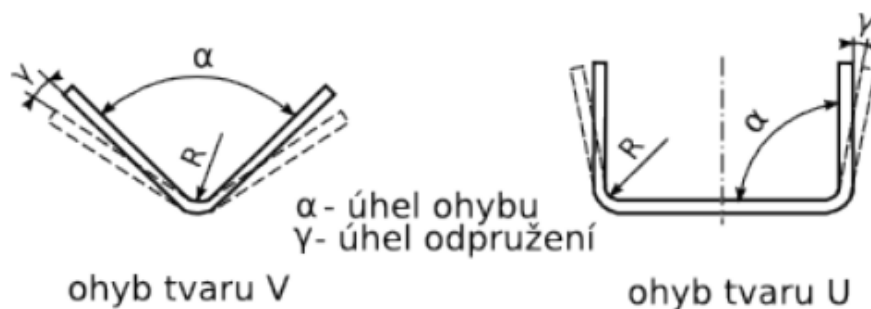
Během ohýbání je v jednotlivých místech průřezu jiné namáhání. Na vnitřní straně ohybu je materiál namáhán tlakem, který způsobuje zkracování materiálu v podélném směru. Na vnější straně ohybu je materiál namáhán tahem, který způsobuje prodloužení materiálu v podélném směru. Tyto namáhání jsou maximální ve vrchní vrstvě materiálu a směrem k neutrální ose se zmenšují až dosáhnou nulové hodnoty. V neutrální ose je materiál bez napětí a bez deformace. Neutrální osa se na začátku procesu nachází uprostřed průřezu, ale během ohýbání se posouvá směrem k vnitřní straně ohybu. [1, 2, 4]



Obr. 5. Průběh napětí a posunutí neutrální osy [5]

Z důvodu že, v materiálu nedochází pouze k plastické deformaci, ale také k pružné deformaci, po odlehčení vnějších sil se materiál částečně vrátí do původního stavu. Tento jev nazýváme odpružení. Velikost odpružení závisí na tvárnosti materiálu, poloměru ohybu a způsobu ohýbání. Aby se odpružení eliminovalo používají se tři metody. První metoda spočívá v ohybu materiálu ve větším úhlu. Tento úhel je zvětšen o hodnotu odpružení. Druhá metoda je kalibrace, ta spočívá ve zvětšení lisovací síly na konci lisovacího cyklu. Zvětšením lisovací síly na konci cyklu dosáhneme plastické deformace v místě ohybu a tím se hodnota odpružení snižuje. Třetí metoda využívá prolisů jako například podbroušení pohyblivé

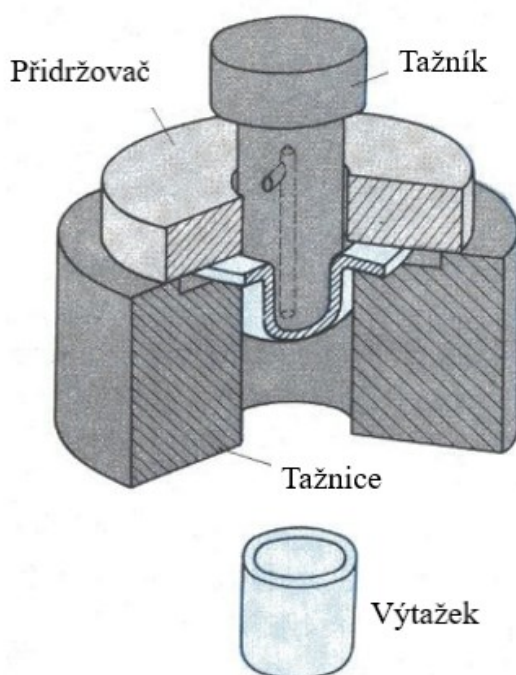
čelisti o úhel odpružení, vylisováním vyztužujícího žebra v místě ohybu atd. Touto metodou se dá odpružení odstranit téměř úplně. [4, 7]



Obr. 6. Odpružení materiálu [4]

1.5.3 Tažení

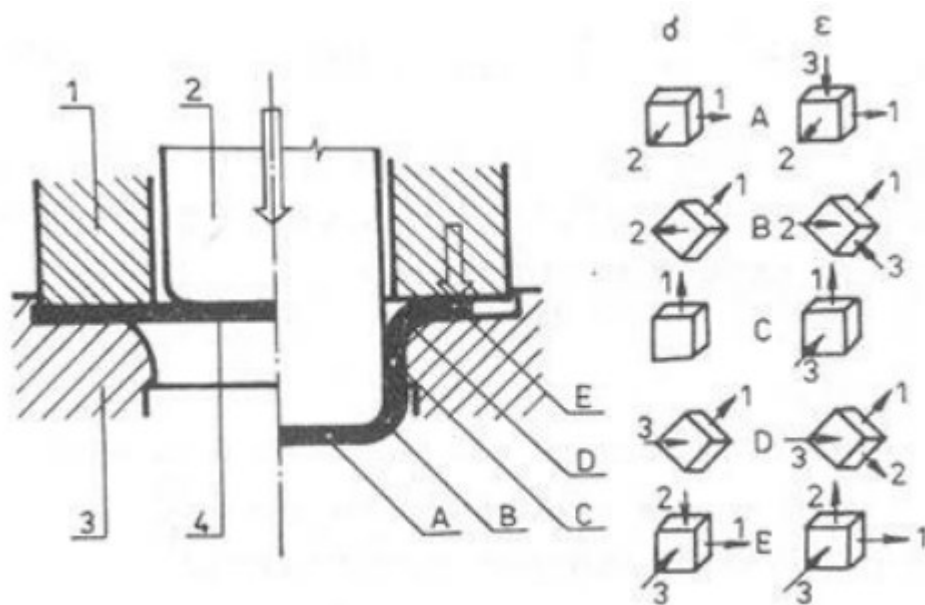
Pro technologii tažení je polotovar plech nebo pás a procesem vzniká prostorový výlisek. Podle velikostí tváření můžeme rozdělit tažení na mělké a hluboké, podle stěna na tažení bez a se ztenčením stěny, dále na rotační, nerotační a na tažení nepravidelných tvarů (tzv. karosářské výlisky). Tažením je proces tváření, kdy pomocí jednoho nebo několika tahů zhotoví z rovinného plechu nebo pásu duté těleso. Nástroje tažidlo, které se skládá z tažníku a tažnice a dalších konstrukčních částí. Výrobek vyrobený touto technologií se nazývá výtažek. [1, 4]



Obr. 7. Tažný nástroj [4]

Napjatost při procesu tažení

Během procesu tváření dochází v jednotlivých místech výtažku k různým napěťovým stavům a tím dochází k anizotropii mechanických vlastností materiálu. Dno výtažku (A) se deformuje minimálně a rovnoměrně ve dvou směrech. Válcová část výtažku (C) je deformována v jednom směru. V zaoblení (B) mezi dnem a válcovou částí výtažku dochází ke dvojosé nebo trojosé deformaci. Část materiálu, která se táhne přes tažnou hranu (D), je namáhána radiálním ohybem a tangenciálním tlakem. Část výtažku, která se nachází pod přidržovačem (E) je namáhána tahem v radiálním směru, tlakem v tangenciálním směru a tlakem kolmo na povrch tažnice. Pokud je tažný nástroj bez přidržovače, zaniká tlak pod přidržovačem. Nejkritičtější napěťové stavy jsou v zaoblení mezi dnem a válcovou částí výtažku. Zde dochází k vysokým tahovým napětím. Důsledkem těchto napětí je ztenčování tloušťky stěny a vzniká nebezpečí utržení dna výtažku. [1, 4, 7]



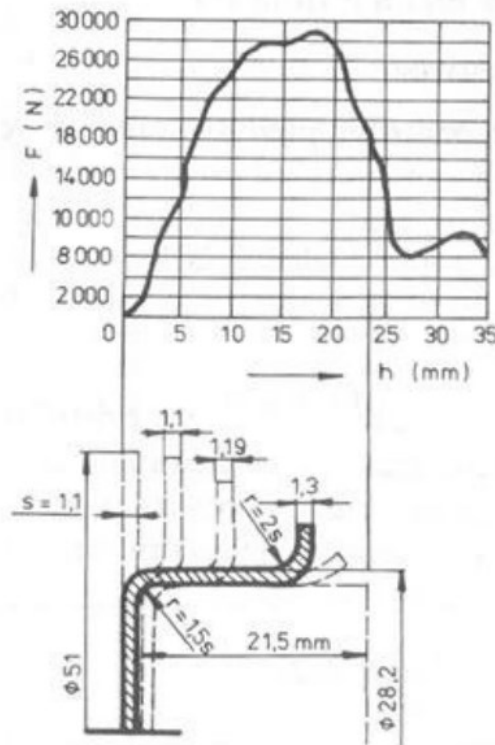
Obr. 8. Schéma napětí a deformace při tažení s přidržovačem [4]

1 – přidržovač, 2 – tažník, 3 – tažnice, 4 – přístřih plechu

Výpočet síly a práce

Vzorce pro výpočet velikosti tažné síly jsou celkem komplikované. Z těchto důvodů se zjednodušují. Vzorce vychází z dovoleného napětí v kritickém průřezu, a proto musí být napětí v tomto průřezu menší než napětí na mezi pevnosti. To znamená že maximální tažná síla musí být menší než síla, která by způsobila utržení dna od bočních stěn výtažku. V průběhu tažení se tažná síla v jednotlivých fázích mění, to znázorňuje Obr. 9. Z obrázku

je vidět že tažná síla začíná na nule a maximální hodnoty nabývá přibližně v polovině tahu. Po dosažení maxima tažná síla začíná klesat. [4, 7]



Obr. 9. Průběh tažné síly [4]

Velikost tažné síly F pro nástroj bez přidržovače:

$$F = S \cdot R_m \text{ [N]} \quad (1)$$

kde S je plocha materiálu [mm^2]

R_m je mez pevnosti [MPa]

Velikost celkové tažné síly F_c pro nástroj s přidržovačem:

$$F_c = F_t + F_p = L \cdot s \cdot R_m + S_p \cdot p \text{ [N]} \quad (2)$$

kde F_t je tažná síla [N]

F_p je síla přidržovače [N]

L je délka obvodu polovýrobku [mm]

R_m je mez pevnosti [MPa]

S_p je plocha přidržovače [mm^2]

p je tlak přidržovače [MPa]

Velikost práce A :

$$A = C \cdot F_c \cdot h \text{ [J]} \quad (3)$$

kde C je koeficient zaplnění plochy [–]

F_c je celková tažná síla [N]

h je výška výtažku [m]

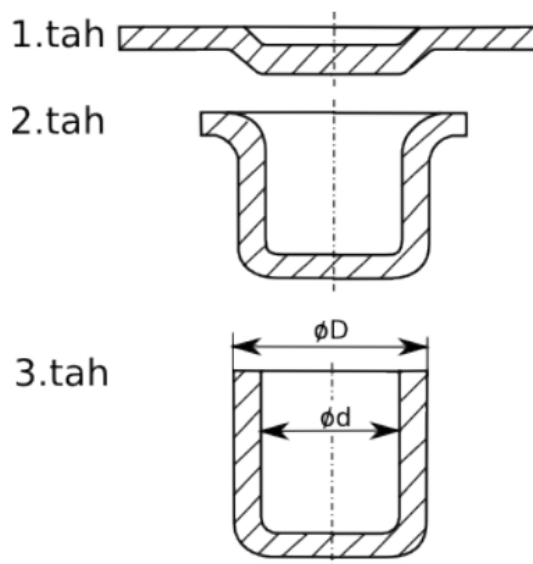
Koeficient zaplnění plochy C je závislý na poměru průměru tažníku d a průměru přístříhu D_0 . Tab. 1. ukazuje tuto závislost pro vybrané hodnoty. [4, 7]

Tab. 1. Vybrané hodnoty C [7]

$m = d/D_0$	0,55	0,60	0,65	0,70	0,80
C	1,00	0,86	0,72	0,60	0,40

Určení velikosti přístříhu a počtu tahů

Celková deformace materiálu při procesu tažení je obvykle příliš velká, z tohoto důvodu obvykle nelze výtažek vytáhnout na jeden tah a proces se rozděluje na více tahů. V prvním tahu se vytáhne velký průměr s malou hloubkou. V dalších tazích se tažený průměr postupně zmenšuje, ale hloubka tahu se zvětšuje. Pokud dojde k vyčerpání plastičnosti materiálu je nutné před dalším tahem provést mezioperační žíhaní. [3, 4, 7]



Obr. 10. Tažení výrobku na tři tahy [4]

K určení maximální deformace na jeden tah a počet potřebných tahů se využívá součinitel tažení m . Celkový součinitel tažení dostaneme součinem jednotlivých součinitelů pro jednotlivé tahy. Tyto součinitele pro tažení válcových nádob se uvádějí v tabulkách a pro

složitější tvary se součinitel stanovuje podle místa, kde se dosahuje maximální hodnoty poměrné hloubky k zakřivení stěny. Obvykle tento součinitel je závislý na druhu materiálu, na předchozím zpevnění, poměrné tloušťce materiálu, tvaru výtažku, tažné rychlosti, tlaku přidržovače, mazání, a hlavně na geometrii tažného nástroje. [4, 7]

Součinitel tažení m :

$$m = \frac{d}{D} = \frac{1}{K} [-] \quad (4)$$

kde d je průměr výtažku [mm]

D je průměr přístřihu [mm]

K je stupeň tažení [-]

Určení tvaru a velikosti přístřihu

Velikost přístřihu ovlivňuje výslednou kvalitu výtažku, proto je velmi důležité určit jeho správnou velikost a tvar. Pro správné určení velikosti přístřihu se používají výpočtové metody, diagramy nebo jejich kombinace. Návrh se řídí zásadou, že plocha přístřihu se rovná ploše výtažku s přídavkem na odstřížení. Jedná se o určitý druh zjednodušení, protože v realitě se boční stěny tažením mírně prodlužují.

V případě tenkých plechů se počítá s vnějšími rozměry výtažku a v případě tlustých plechů se počítá se středním rozměrem tloušťky plechu. Z důvodů cípatosti se v případě, kdy je výtažek zhotoven jedním tahem zvětšuje průměr přístřihu o 3 % a při každé další operaci se připočítává 1 %. [3, 7]

Velikost přístřihu D_0 pro válcový výtažek bez příruby:

$$D_0 = \sqrt{d^2 + 4 \cdot d \cdot h} [mm] \quad (5)$$

kde d je vnitřní průměr výtažku [mm]

h je minimální výška výtažku [mm]

Velikost přístřihu D_0 pro válcový výtažek s přírubou:

$$D_0 = \sqrt{d_p^2 + 4 \cdot d \cdot h - 3,44 \cdot d \cdot r} \text{ [mm]} \quad (6)$$

kde d_p je průměr příruby výtažku [mm]

d je vnitřní průměr výtažku [mm]

h je minimální výška výtažku [mm]

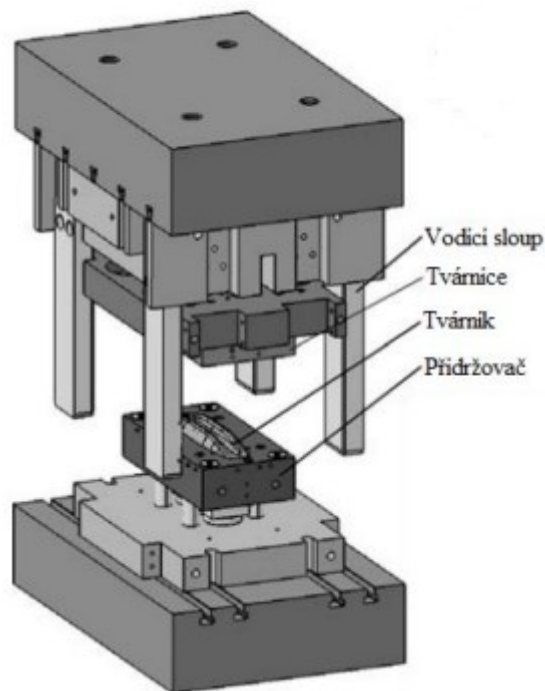
r je poloměr zaoblění přechodu stěny do příruby a dna výtažku [mm]

Technologické zásady a mazání

Pro docílení kvalitního výtažku je nutné dodržovat určité technologické zásady. Jako výšku výtažku volit co nejmenší, preferovat výtažky rotační a s rovným dnem, v případě hranatých výtažku zaoblit hrany, výtažky s přírubou volit jen v nutných případech a volit materiály, které mají dobré tažné vlastnosti. Další důležitou zásadou je použití maziva. Mazivo snižuje tření a tím snižuje i potřebnou tažnou sílu a zároveň napomáhá ke zlepšení kvality povrchu výtažku. Mazivo se nepoužívá na celý přístřih, protože ze strany střižníku se snažíme mít tření co největší, naopak ze strany střižnice a na části přístřihu mezi přidržovačem a materiálem se snažíme tření co nejvíce snížit, tudíž použít co nejlepší mazání. Použité mazivo nesmí poškodit povrch výtažku ani povrch nástroje, vytvářet lepidlo, být zdravotně závadné a musí být snadno odstranitelné, být ekologické, vytvářet rovnoměrnou vrstvu a tepelně stálé. Používané maziva jsou ropné oleje s přídavkem parafinu nebo tuhého maziva (grafitu, talku, křídly aj.), rostlinné oleje (nejčastěji řepkový olej), živočišné oleje a tuky (lůj, rybí olej), olejové emulze, vodní roztoky mýdel a suchá prášková mýdla. Samotná tuhá maziva jako grafit se používají v případě tažení za tepla. [3, 7]

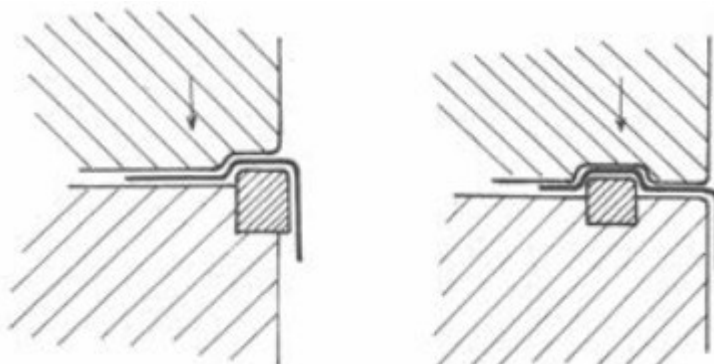
Nástroje pro tažení

Nástrojem pro tažení je tzv. tažný nástroj. Hlavními částmi jsou tažník a tažnice, které tváří materiál. Další důležitou částí je přidržovač, který zabraňuje zvlnění plechu. Tažné nástroje můžeme rozdělit podle několika kritérií. Podle charakteru operace na jednoduché, sloučené a speciální. Podle druhu lisu na jednočinné, dvojčinné a postupové. Podle přidržovače na nástroje bez přidržovačem a s přidržovačem. Přidržovač může být pružinový, pryžový, pneumatický nebo hydraulický. [7, 9]



Obr. 11. Tažný nástroj [9]

K výrobě dílu karoserie se využívají speciální lisy (tzv. karosářské lisy). Tyto lisy disponují velkou rezervou v tažných silách z toho důvodu se často ani neprovádí kontrola tvářecích sil. Nástroje, které se používají v těchto lisech se liší od klasických nástrojů v několika ohledech. Tažná hrana bývá částí, která se nejrychleji opotřebuje, proto bývá tvořena vložkou, která umožňuje snadnou výměnu v případě opotřebení nebo změny tvaru. Aby bylo docíleno zvýšení brzdného účinku používají se brzdné lišty. Tyto brzdné lišty mohou mít mnoho tvarů, např. obdélníkový, kruhový, trojúhelníková atd. [9]



Obr. 12. Vložka tažné hrany (vlevo) a brzdící lišta (vpravo) [5]

2 MATERIÁL VHODNÝ K PLOŠNÉMU TVÁŘENÍ

Materiály používané při tváření za studena by měly splňovat nejen technické požadavky na design výrobku, ale také požadavky procesu tváření a následného zpracování (jako je řezání, svařování, galvanické pokovování atd.). Základní požadavek na materiál v procesu tváření je tváritelnost. Aby se zlepšila kvalita tvářených dílu, materiál by měl mít dobrou tváritelnost. S tváritelností materiálu úzce souvisí jeho mechanické vlastnosti. Materiály by proto měly mít dobrou plasticitu, malý poměr meze kluzu a vysoký modul pružnosti. [3, 7]

2.1 Vlastnosti materiálu

Všechny klíčové vlastnosti materiálu ovlivňují faktory, jako jsou chemické složení, textura materiálu a mikrostruktura. Z hlediska chemického složení, na materiály určené k hlubokému tažení má největší vliv uhlík. Pro materiály určené k hlubokému tažení je obsah uhlíku maximálně 0,07 %. Kromě uhlíku tváritelnost ovlivňují i další prvky:

Mangan – zvyšuje pevnost a tvrdost, ale snižuje houževnatost. Vytváří společně se sírou dobře tváritelné sulfidy. Doporučený obsah manganu je maximálně 0,40 %.

Křemík – zpevňuje materiál a tím zhoršuje plastické vlastnosti materiálu. Doporučený obsah křemíku je maximálně 0,03 %.

Fosfor a síra – jedná se o nežádoucí prvky v materiálu určeného k hlubokému tažení. Obsah těchto prvků má být co nejnižší (maximálně 0,025 %).

Dusík a kyslík – tyto prvky tvoří oxidy a nitridy, které snižují plastické vlastnosti materiálu. Obsah těchto prvků je do 0,006 %.

Doprovodné prvky – do oceli se dostávají z ocelového odpadu. Většina prvků způsobuje zpevnění materiálu, které je nežádoucí. Proto obsah těchto prvků má být co nejnižší. Doporučený obsah je maximálně 0,15 % Cu, 0,03 % Cr a 0,1 % Ni. [3, 7]

Při mechanických a technologických zkouškách se sledují parametry, jako jsou: mez kluzu (R_e), mez pevnosti (R_m), tažnost (A_{80}), kontrakce (z), tvrdost (HV), hloubka vtisku podle Erichsena (h), minimální poloměr ohybu (R_{min}) a poměr R_e/R_m . Pro tenké hlubokotažné plechy je doporučený poměr $R_e/R_m \leq 0,7$. Pro velmi složité výtažky se doporučuje $R_e/R_m \leq 0,65$. [7]

2.2 Kvalita a rozměrová přesnost plechů

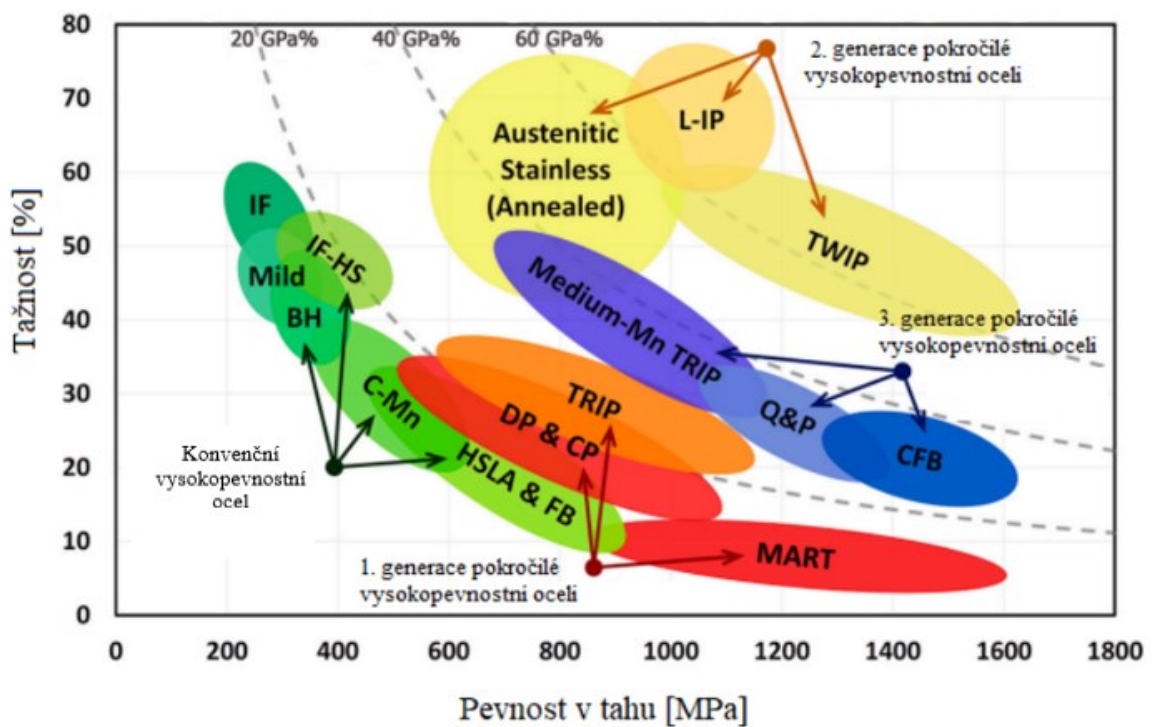
Výroba plechu se skládá z několika operací, jako odlévání, válcování a tepelného zpracování. Tenké plechy se vyrábí pomocí válcování za studena z plechů vyrobených válcováním za tepla. Před válcováním za studena je nutné odstranit okuje z povrchu plechu. Samotným válcováním dochází ke zpevnění a orientaci struktury ve směru válcování a tím vzniká anizotropie plechu. Tuto anizotropii je nutné odstranit rekrytalizačním žíháním. Každá z těchto operací a její podmínky, jako teplota, velikost úběru při válcování aj. mají vliv na konečnou kvalitu a rozměrovou přesnost plechu.

Povrch plechu určeného k hlubokému tažení má být rovný, čistý v lesklém nebo matném stavu. Povrch nesmí obsahovat šupiny, trhliny, zaválcované okuje, dutiny, různé vměstky a kvalitnější plechy nesmí být zbarveny po tepelném zpracování. Na kvalitu procesu tažení má vliv také drsnost povrchu (R_a) a tvar profilu výstupků. Tyto parametry zajišťují nosný prostor pro mazivo.

Z hlediska tloušťky stěny se plechy dělí na velmi tenké (do 0,4 mm), tenké (0,4 až 4 mm) a tlusté (nad 4 mm). Podle tohoto rozdělení mají dané také tolerance. U tenkých plechů je to 7 až 10 % a u tlustých 3 až 6,5 % jmenovitého rozměru. [7]

2.3 Druhy ocelí

Existuje velké množství druhů ocelí, které se využívají k procesu hlubokého tažení. Při volbě správného druhu oceli musíme vzít v úvahu jak samotný proces tažení, tak i požadavky na finální produkt. Z pohledu procesu tažení se musíme zohlednit míru přetvoření materiálu, tudíž nás zajímá tažnost. Zatímco od finálního výrobku budeme vyžadovat hlavně jeho pevnost. Obr. 13. znázorňuje závislost meze pevnosti v tahu na tažnosti u jednotlivých druhů ocelí. [10]



Obr. 13. Graf závislosti pevnosti v tahu na tažnosti pro různé druhy ocelí [10]

2.3.1 Nízkopevnostní oceli

Jsou to měkké hlubokotažné oceli s řízenou mezí kluzu. Mezi tyto oceli patří IF oceli a Mild oceli. Mechanické vlastnosti jako mez kluzu ($R_{p0,2}$), mez pevnosti v tahu (R_m) a tažnost (A_{80}) jsou uvedeny v Tab. 2. [11]

Tab. 2. Mechanické vlastnosti nízkopevnostních ocelí [12]

Nízkopevnostní oceli			
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
IF oceli	165	120-290	47
Mild oceli	172	310	46

IF (Interstitial Free) oceli

Struktura této oceli nemá žádné intersticiální atomy, které by způsobovali zpevnění oceli. Z tohoto důvodu tato ocel disponuje extrémně vysokou tažností. Využívá se pro tvarově složité hlubokotažné díly. IF oceli mají feritickou matici a legující prvek je Ti nebo Nb. Tyto legury snižují obsah C a N a tím je dosaženo dobrých plastických vlastností. [12, 13]



Obr. 14. Struktura IF oceli [12]

Mild oceli

Jedná se o nízkopevnostní a nízkouhlíkové oceli s feritickou strukturou. Legujícími prvky jsou Ti nebo Nb. Dříve se hojně využívali jako karosářské plechy, ale jejich využití postupně klesá kvůli vysoké hmotnosti. [12]

2.3.2 Vysokopevnostní oceli

Jedná se o nejvíce využívané konvenční oceli s vysokou pevností. Mezi tyto oceli patří BH, IF-HS a HSLA oceli. Mechanické vlastnosti jako mez kluzu ($R_{p0,2}$), mez pevnosti v tahu (R_m) a tažnost (A_{80}) jsou uvedeny v Tab. 3.

Tab. 3. Mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí [12]

Vysokopevnostní oceli			
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
IF-HS oceli	180-230	340-400	≥ 35
BH oceli	180-231	300-360	≥ 34
HSLA oceli	340-400	420-490	≥ 23

IF-HS (Interstitial Free – High Strength) oceli

Jedná se o IF oceli, které jsou legované pomocí Mn, Si a P. Jedná se o oceli s feritickou strukturou. Vyznačují se vysokým exponentem deformačního zpevnění a mají dobrou hlubokotažnost, proto se využívají pro složité součásti, které vyžadují vysokou pevnost. [11, 14]

BH (Bake Hardenable) oceli

BH oceli jsou nízkouhlíkové s feritickou strukturou. Tyto oceli se kontrolovaně žihají a tím je docíleno zpevnění. Tento proces stabilizuje dislokace intersticiálními atomy C a N. Jedná

se o řízené stárnutí materiálu, které probíhá při teplotách okolo 170 °C po dobu 20 minut. Oceli se využívají k mělčím tahům a tím pádem nedochází k výraznému zpevnění během procesu tažení, ale až během dodatečného BH efektu. [12]

HSLA (High Strength Low Alloy) oceli

HSLA oceli se vyznačují velmi nízkým obsahem uhlíku a vysokou plasticitou. Ke zpevňování dochází pomocí legujících prvků, mezi které patří V, Ti a Nb. Mají velkou hlubokotažnost a proto se využívají pro náročné výlisky. Další výhodou je vysoká pevnost a malá hmotnost, v porovnání s běžnou uhlíkovou ocelí se stejnou pevností je HSLA ocel o 20–30 % lehčí. [11]

2.3.3 Pokročilé vysokopevnostní oceli

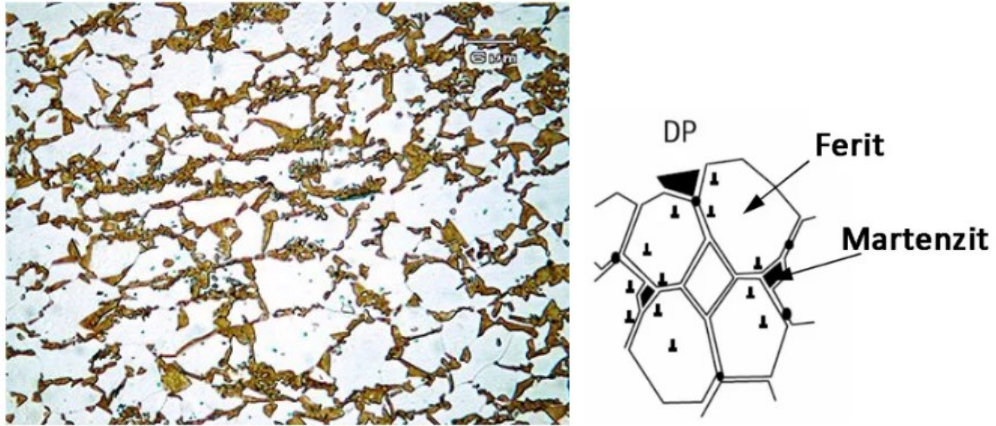
Jedná se o speciální materiály, které mají v porovnání s vysokopevnostními oceli vyšší pevnost. Mezi tyto oceli patří DP, CP, TRIP, TWIP a MS oceli. Mechanické vlastnosti jako mez kluzu ($R_{p0,2}$), mez pevnosti v tahu (R_m) a tažnost (A_{80}) jsou uvedeny v Tab. 4.

Tab. 4. Mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí [12]

Pokročilé vysokopevnostní oceli			
	$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
DP oceli	330-410	600-700	≥ 21
CP oceli	680-830	≥ 780	≥ 10
TRIP oceli	410-510	690-800	≥ 25
TWIP oceli	480	1140	57,3
MS oceli	≥ 950	1200-1400	≥ 3

DP (Dual Phase) oceli

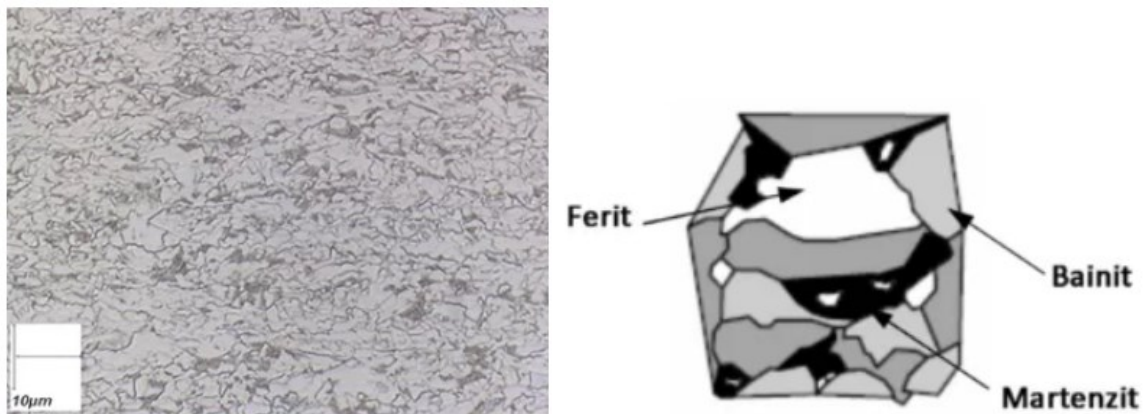
DP oceli se vyznačují vysokými hodnotami pevnosti a tažnosti. Těchto vlastností dosahují kombinovanou strukturou, která se skládá z pevné martenzitické struktury (10-30 %) v podobě ostrůvků a z měkké feritické matrice (70-90 %), která zajišťuje plasticitu. Tyto oceli mají schopnost vysokého mechanického zpevnění díky legujícím prvkům, jako jsou Mn, Cr, Mo, V a Ni. Schopnost zpevnění se dále zvyšuje pomocí BH efektu. Mezi výhody DP ocelí patří odolnost proti únavovým lomům a odolnost proti teplotnímu stárnutí. Využití nachází hlavně v automobilovém průmyslu jako konstrukční a bezpečnostní díly karoserie (nosníky, sloupky, výztuhy střech a podlah, nárazníková konstrukce, aj.). [11]



Obr. 15. Struktura DP oceli [12]

CP (Complex Phase) oceli

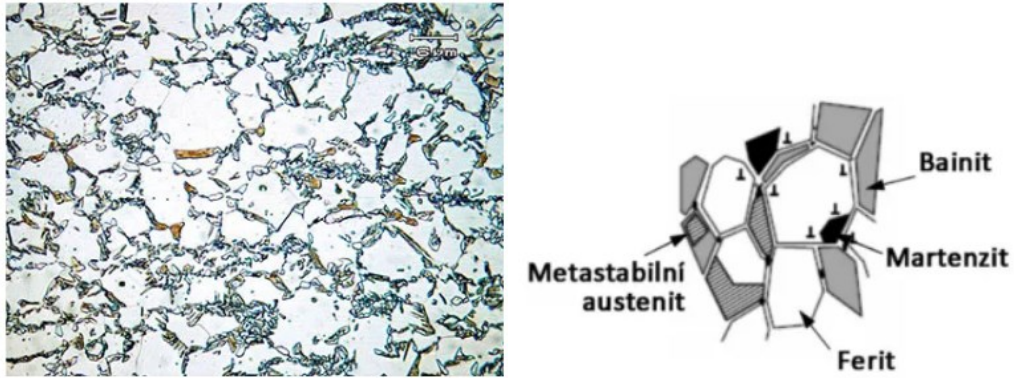
Struktura CP oceli se skládá z malého množství martenzitu a feriticko-bainitické matrice. Výhodou této struktury je vysoká hodnota meze kluzu při zachování meze pevnosti v tahu. Využití nachází v automobilovém průmyslu pro jednoduché tvary s malou deformací. [12]



Obr. 16. Struktura CP oceli [12]

TRIP (TRansformation Induced Plasticity) oceli

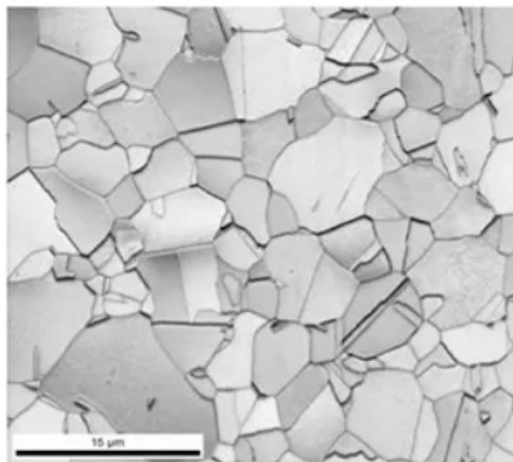
Jedná se o multifázové oceli, které se vyznačují vynikající pevností a tažností. Jejich struktura se skládá měkké feritické matrice (50-60 %), bainitu (25-40 %), zbytkového austenitu (5-15 %) a martenzitu (jednotky %). Při plastické deformaci dochází v této struktuře k tzv. TRIP efektu. Při tomto efektu dochází k přeměně austenitu na martenzit. TRIP oceli stejně jako DP oceli nacházejí využití v automobilovém průmyslu jako konstrukční a bezpečnostní díly (nosníky, výztuhy, sloupky, aj.). [10, 11]



Obr. 17. Struktura TRIP oceli [12]

TWIP (TWinning Induced Plasticity) oceli

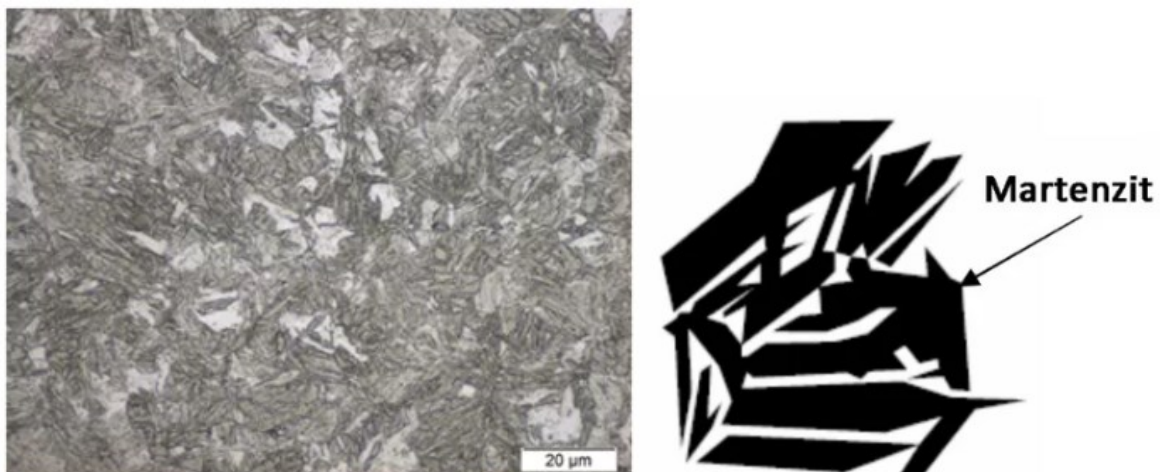
Tyto oceli jsou charakteristické TWIP efektem, tedy plastickou deformací probíhající pomocí mechanismu dvojčatění. Tento mechanismus spotřebovává hodně energie. TWIP oceli mají vysoký obsah Mn (17-24 %), dalšími legujícími prvky jsou Al a Si. Matrice je díky legurám zcela austenitická, to zajišťuje extrémní hodnoty tažnosti při velmi vysoké pevnosti. Díky těmto vlastnostem nachází uplatnění v automobilovém průmyslu v deformačních zónách karoserie. [11, 15]



Obr. 18. Struktura TWIP oceli [12]

MS (Martensitic Steel) oceli

Struktura MS oceli se skládá z martenzitu a z malého množství feritu a bainitu. Martenzitická struktura se získává pomocí kalení. Díky této struktuře dosahuje MS ocel nejvyšší pevnosti v tahu, ale její tažnost není příliš vysoká. Z toho důvodu se někdy provádí popouštění, aby se zvýšila tažnost. Využití nachází v bezpečnostních prvcích se zvýšenou odolností proti nárazu. [11]



Obr. 19. Struktura MS oceli [12]

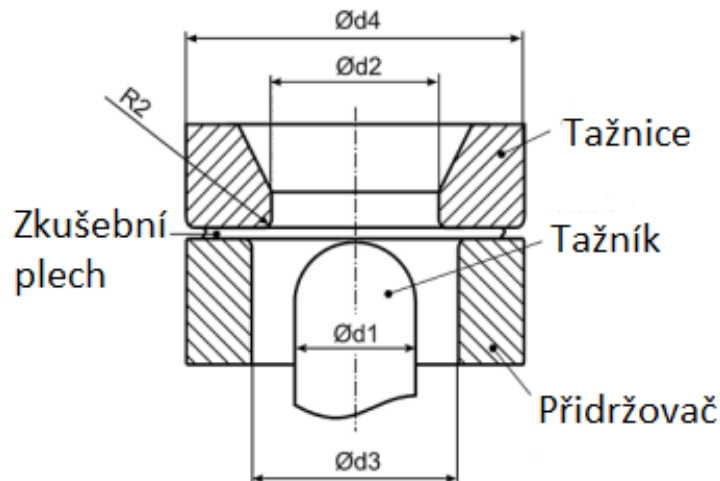
3 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

Pro zjištění vhodnosti materiálu pro proces tváření se používají technologické zkoušky, které simulují reálný proces. Výsledkem těchto zkoušek je tvářitelnost daného materiálu. Tvářitelnost je klíčová vlastnost pro zajištění bezproblémové výroby s dobrou kvalitou výrobků. Mezi hlavní zkoušky patří:

- zkouška hloubení podle Erichsena,
- zkouška kalíškovací,
- zkouška podle Engelhardta – Grosse,
- zkouška na rozšiřovaném otvoru podle Siebela a Pompa,
- zkouška tažením v kuželové tažnici,
- zkouška hydraulická,
- zkouška dvojosým tahem. [7]

3.1 Zkouška hloubením podle Erichsena

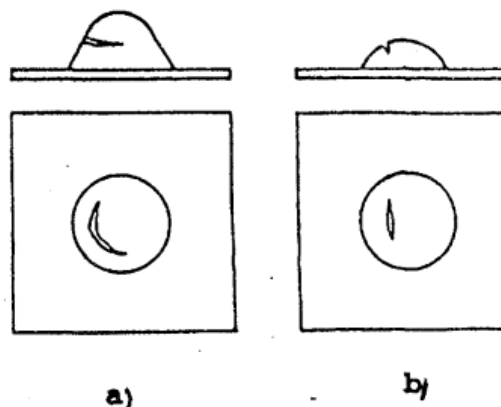
Zkouška slouží k zjištění vhodnosti tenkých plechů k technologii hloubkového tažení. Zkouška je normalizována podle ČSN 42 0406 a ISO 20 482. Zkušební plech je upnut mezi tažnici a přidržovač. Principem zkoušky je hydraulické nebo ruční vtlačování kulového tažníku o průměru 20 mm a vytvoření prohloubení ve zkušebním plechu až do vzniku první trhliny v celé tloušťce plechu. Hodnotící parametr této zkoušky potom je velikost prohloubení, při němž vznikne trhlina. Jedná se o jednoduchou a rychlou zkoušku. Nevýhodou zkoušky je že nezohledňuje anizotropní mechanické vlastnosti zkušebního plechu a při ručním vtlačování tažníku mohou být výsledky ovlivněny obsluhou, protože velikost prohlubně je závislá na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku. Výsledkem této zkoušky je Erichsenovo číslo (EI). Toto číslo nám uvádí dráhu v milimetrech, kterou urazí tažník od prvního kontaktu se zkušebním plechem až do vzniku trhliny. [7, 16, 17]



Obr. 20. Nástroj při Erichsenově zkoušce [17]

$d_1 - 20 \text{ mm}$, $d_2 - 27 \text{ mm}$, $d_3 - 33 \text{ mm}$, $d_4 - 55 \text{ mm}$, $R_2 - 0,75 \text{ mm}$

Vhodnost plechu k hlubkovému tažení se určuje nejen podle velikosti prohlubně, ale také podle tvaru vzniklé trhliny. [17]

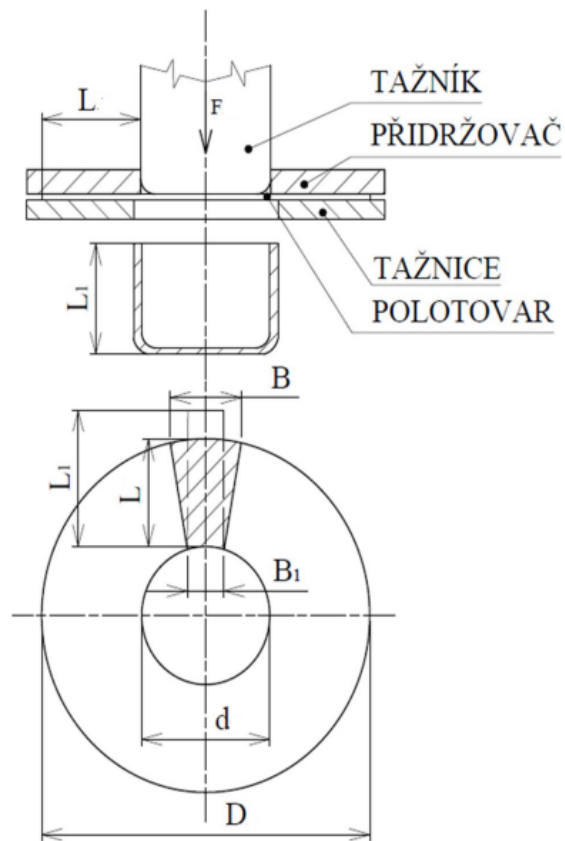


Obr. 21. Tvar trhliny při Erichsenově zkoušce [7]

a – vhodný plech k hlubokému tažení, *b* – nevhodný plech k hlubokému tažení

3.2 Zkouška kalíškovací

Kalíškovací zkouška je určena pro rotačně symetrické tvary. Její průběh je zdlouhavý, protože je mnohokrát opakována s postupně rostoucím průměru rondelu D . Principem zkoušky je tažení zkušebního rondelu o průměru $D = d + 2L$ na kalíšek tažníkem o průměru $d = 50 \text{ mm}$, výška kalíšku je $L_1 < L$. Podmínky zkoušky odpovídají podmínkám reálného procesu tažení výtažku. Mezi výhody zkoušky patří hodnocení anizotropie mechanických vlastností. [7, 16]



Obr. 22. Princip kališkovací zkoušky [7]

Hodnoticí kritérium hlubokotažnosti m :

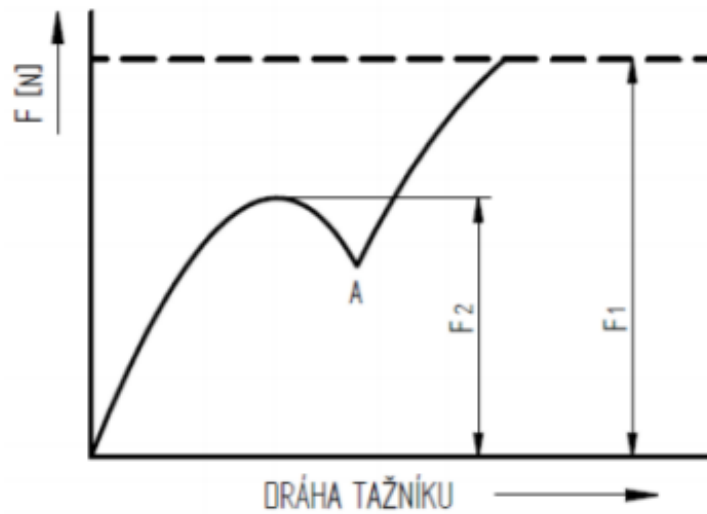
$$m = \frac{d}{D} [-] \quad (7)$$

kde d je průměr tažníku [mm]

D je maximální průměr rondelu, z kterého lze vytáhnout kalíšek bez porušení [mm]

3.3 Zkouška podle Engelhardta – Grosse

Principem Gross – Engelhardtovi zkoušky je vytažení kalíšku. V první fázi dochází k vystřížení zkušebního tělesa z pásu plechu o šířce 58 mm. Zkušební těleso je rondel o průměru 52 mm. Během druhé fáze dochází k tažení do překročení tažné síly F_2 . Po překročení této tažné síly dojde k navýšení tažné síly na hodnotu F_1 , při které dojde k odtržení dna kalíšku. Na Obr. 23. je znázorněn průběh tažné síly během zkoušky. [7]



Obr. 23. Průběh tažné síly během Gross – Engelhardtovi zkoušky [7]

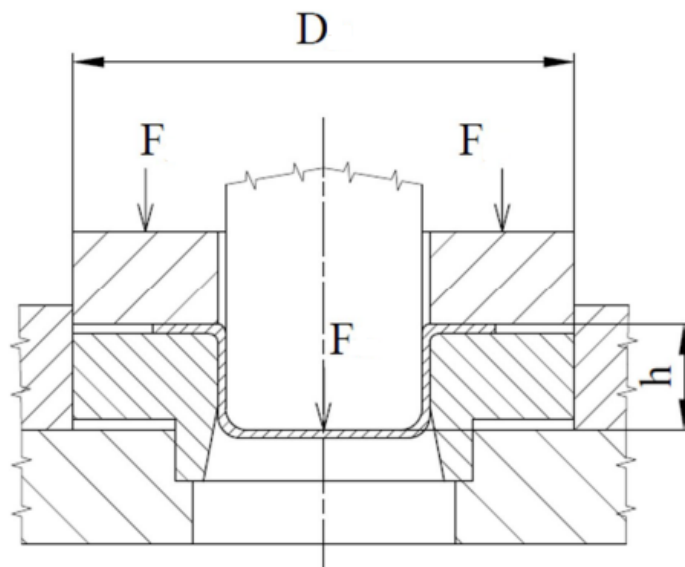
Hodnotící kritérium hlubokotažnosti T :

$$T = \frac{F_1 - F_2}{F_1} \cdot 100 \text{ [%]} \quad (8)$$

kde F_1 je tažná síla při které dojde k utržení dna [N]

F_2 je tažná síla [N]

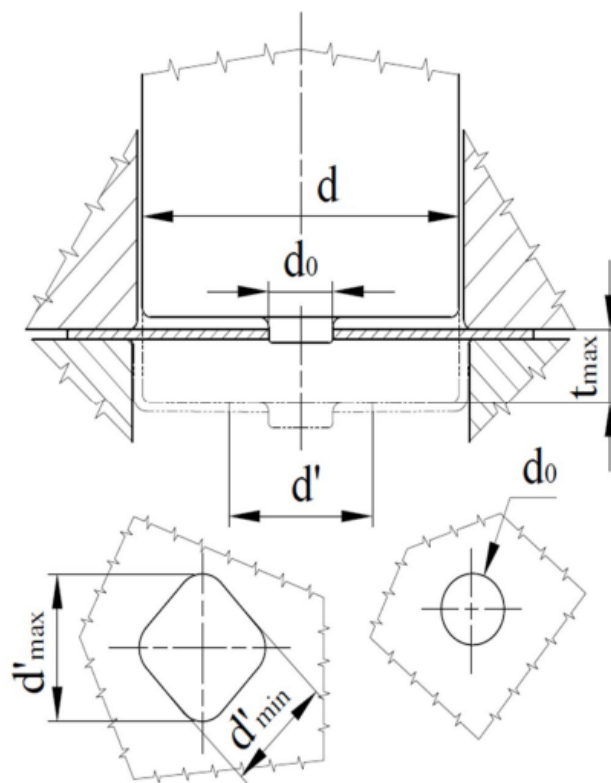
Materiály, které jsou vhodné k hlubokému tažení mají hodnotu $T > 40 \text{ %}$. [7]



Obr. 24. Princip Gross – Engelhardtovi zkoušky [7]

3.4 Zkouška rozšiřováním otvoru podle Siebela a Pompa

Princip zkoušky spočívá v rozšiřování otvoru o průměru d_0 na čtvercovém zkušebním plechu. Tento plech je upnut pomocí přidržovače a tažen válcovým tažníkem. Při tažení dochází k rozšiřování původního otvoru do doby, než se objeví první radiální trhliny v okolí otvoru. Při této zkoušce se poté vyhodnocuje hloubka prohloubení t , rozšíření otvoru d' a nerovnoměrnosti deformace otvoru n . Čím větší je prohloubení t a rozšíření otvoru d' a čím menší je nerovnoměrnost deformace n , tím je daný plech vhodnější k hlubokému tažení. [7, 18]



Obr. 25. Princip zkoušky rozšiřování otvoru podle Siebela a Pompa [7]

Souhrnné vyjádření vhodnosti plechu k hlubokému tažení q :

$$q = \frac{t_{max} \cdot (d'_{max} + d'_{min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{max} - d'_{min})} \text{ [mm]} \quad (9)$$

kde t_{max} je hloubka prohloubení [mm]

d_0 je původní průměr otvoru [mm]

d'_{max} je maximální průměr otvoru [mm]

d'_{min} je minimální průměr otvoru [mm]

Rozšíření otvoru d' :

$$d' = \frac{d'_{max} + d'_{min}}{2} \text{ [mm]} \quad (10)$$

kde d'_{max} je maximální průměr otvoru [mm]

d'_{min} je minimální průměr otvoru [mm]

Nerovnoměrnost deformace n :

$$n = \frac{d'_{max} - d'_{min}}{d'} \text{ [-]} \quad (11)$$

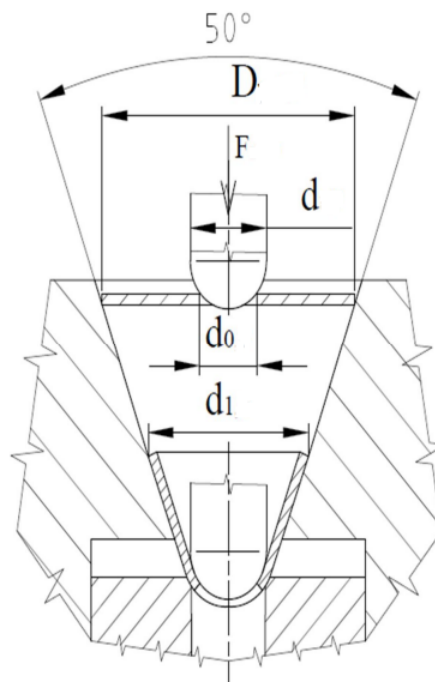
kde d' je rozšíření otvoru [mm]

d'_{max} je maximální průměr otvoru [mm]

d'_{min} je minimální průměr otvoru [mm] [7, 18]

3.5 Zkouška tažením v kuželové tažnici

Zkouška tažení v kuželové tažnici se také nazývá Fukuiho zkouška. Zkouška spočívá v tažení kruhového rondelu, který má ve středu vyvrtanou díru. Tažení probíhá v kuželové tažnici do doby vzniku trhliny. Průměr rondelu se volí $D = 2 \cdot d_0$ a průměr tažníku se volí $d = 2 \cdot d_0$. [7, 16, 19]



Obr. 26. Princip Fukuiho zkoušky [7]

Hodnoticí kritérium hlubokotažnosti m_F :

$$m_F = \frac{d_1}{D} [-] \quad (12)$$

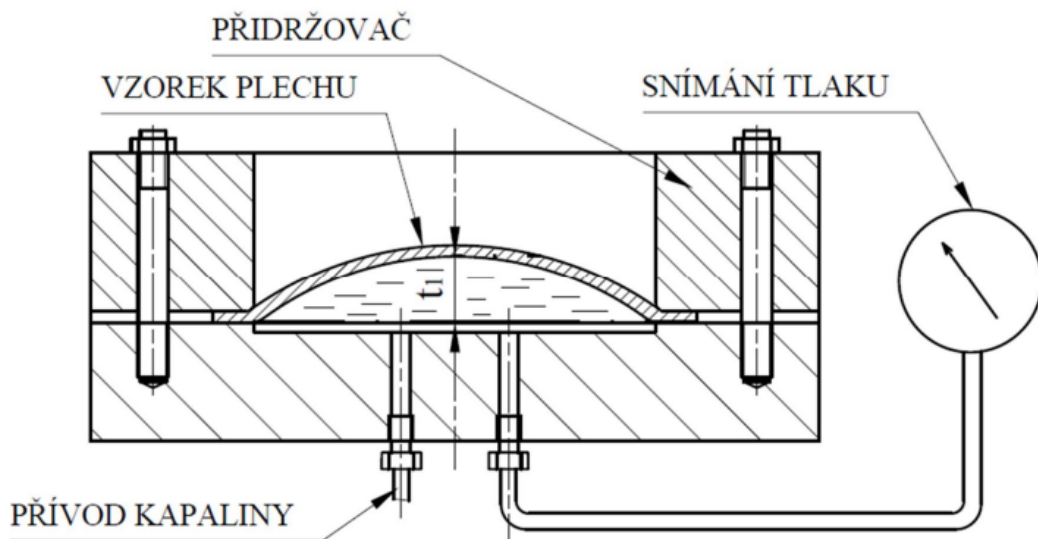
kde d_1 je největší průměr kuželového výtažku [mm]

D je průměr rondelu [mm]

Z hodnoty kritéria m_F vyplývá, že čím je toto kritérium menší, tím je daný materiál vhodnější k hlubokému tažení. [7]

3.6 Zkouška hydraulická

Zkušební těleso je upnuto pomocí přidržovače. Následně je pod zkušební těleso přiváděna tlaková kapalina. Vlivem tlaku, který vyvozuje kapalina je plech vyboulen. Vyhodnocení zkoušky spočívá ve velikosti tohoto vyboulení v okamžiku vzniku trhliny. Dalšími výsledky zkoušky jsou vyhodnocení tvaru praskliny a posouzení deformovaného povrchu. Nevýhodou hydraulické zkoušky je složitá konstrukce s vysokými nároky na těsnost. V porovnání s Erichsenovou zkouškou je hydraulická zkouška rychlejší a objektivnější. [7, 20]



Obr. 27. Princip hydraulické zkoušky [7]

4 MECHANICKÉ ZKOUŠKY

Pro hluboké tažení plechů se využívají materiály, které dosahují velkých deformací bez vzniku porušení. Tyto vlastnosti jsou primárně dány mechanickými vlastnostmi. Proto se provádí zkoušky mechanických vlastností. Mezi základní zkoušky se řadí tahová zkouška a zkouška tvrdosti.

4.1 Zkouška tvrdosti

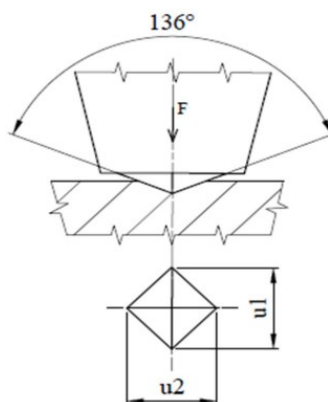
Tvrdost je mechanická vlastnost, která vyjadřuje odolnost materiálu proti vniknutí cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti můžeme podle principu rozdělit na zkoušky vnikací a odrazové a podle zatěžující síly na zkoušky statické a dynamické.

V případě tenkých hlubokotažných plechů se využívají metody měření dle Vickerse. Brinellovu metodu je poté možné využít v případě tlustých plechů. Při měření tvrdosti plechů je zapotřebí dodržovat zásadu, že tloušťka plechu musí být minimálně 8krát větší, než je hloubka vtisku.

Z výsledků zkoušek tvrdosti lze pomocí koeficientů vypočítat orientační pevnost materiálu. Je však vhodné zkoušky tvrdosti skombinovat s technologickými zkouškami tvářitelnosti, abychom dostali podrobnější a přesnější informace o vlastnostech daného materiálu. [7]

4.1.1 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Principem zkoušky je vtláčování pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° do povrchu zkušebního tělesa. Následné vyhodnocení zkoušky spočívá v změření střední délky úhlopříček vtisku. Zatěžující síla se pohybuje v rozmezí 10 až 1 000 N a doba po kterou působí bývá 10 až 180 sekund. [21, 22]



Obr. 28. Princip Vickersovi zkoušky [22]

Tvrdot podle Vickerse se značí HV . Velikost tvrdosti lze určit pomocí tabulek, podle velikosti zatěžující síly a velikosti uhlopříčky nebo podle výpočtového vztahu.

Hodnota tvrdosti podle Vickerse HV :

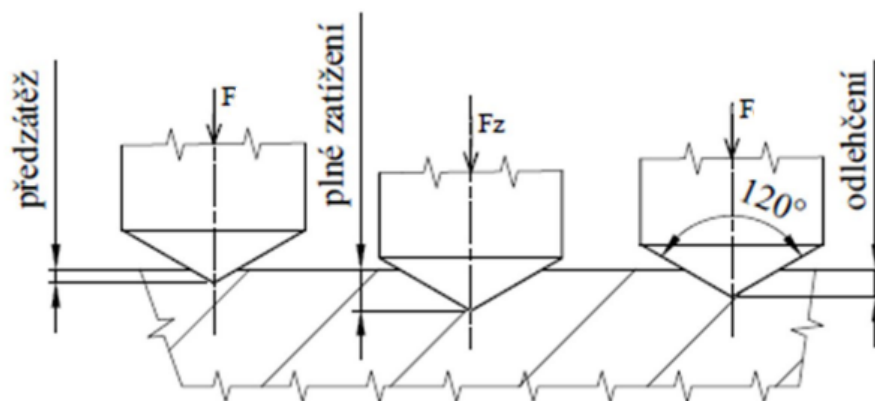
$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{u^2} [MPa] \quad (13)$$

kde F je zatěžující síla [N]

u je průměrná hodnota uhlopříček [mm]

4.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Principem Rockwellovi zkoušky je vlačování kuželu s vrcholovým úhlem 120° nebo kuličky s průměrem 1,5875 mm do povrchu zkušební tělesa. V první fázi je zkušební těleso vlačováno silou F , která má velikost 100 N. V druhé fázi se zatěžující síla zvedne na hodnotu F_z a nechá se působit 10 až 15 sekund. Po této době se zatěžující síla sníží na hodnotu předběžného zatížení. Výsledkem zkoušky je rozdíl hloubky vtisku mezi předběžným zatížením a odlehčením zkušebního zatížení. [23]



Obr. 29. Princip Rockwellovi zkoušky [23]

Rockwellova zkouška se dělí na tři metody:

- HRA – Využívá se pro měření tenkých povlaků, slinutých karbidů.

Zkušební těleso je kužel a zatěžující síla je 600 N.

- HRB – Využívá se pro měření měkkých kovů.

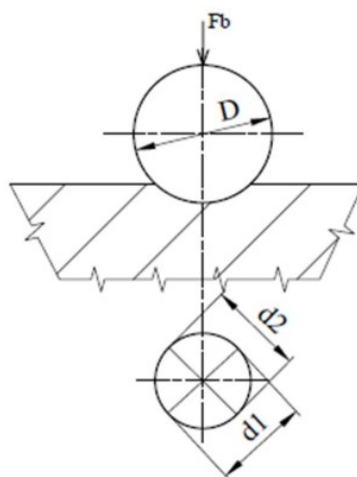
Zkušební těleso je kulička a zatěžující síla je 1 000 N.

- HRC – Využívá se pro měření tvrdých materiálů.

Zkušební těleso je kužel a zatěžující síla je 1 500 N. [23]

4.1.3 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Principem Brinellovi zkoušky je vtlačování kuličky do povrchu zkušebního tělesa. Vyhodnocení zkoušky probíhá měřením dvou na sebe kolmých průměrů vtisku. Průměr kuličky bývá 1 mm, 2,5 mm, 5 mm a 10 mm. Průměr kuličky se volí v závislosti na tloušťce měřeného materiálu. Platí zásada, že tloušťka materiálu by měla být 8krát větší než hloubka vtisku. [23, 24]



Obr. 30. Princip Brinellovi zkoušky [23]

Tvrdotost podle Brinella se značí HB . Velikost tvrdosti lze určit pomocí tabulek, podle velikosti zatěžující síly, průměru kuličky a doby zatížení nebo podle výpočtového vztahu.

Hodnota tvrdosti podle Brinella HB :

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A} \text{ [MPa]} \quad (14)$$

kde F je zatěžující síla [N]

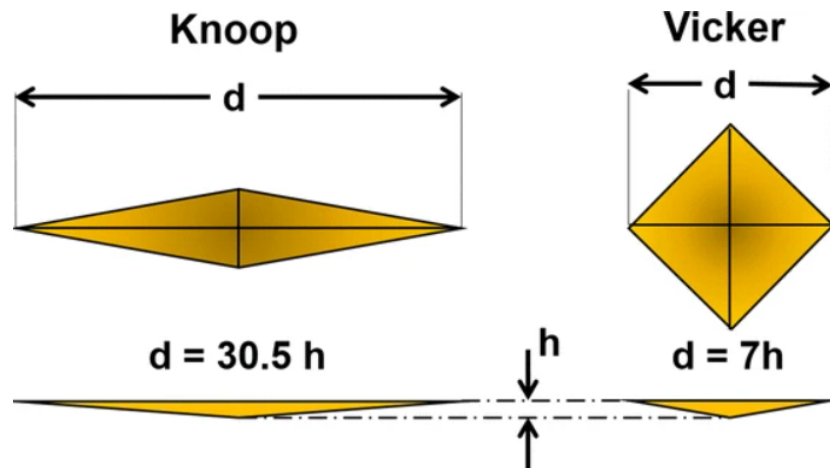
A je plocha kulového vtisku [mm^2]

4.1.4 Zkoušky mikrotvrdomosti

Zkoušky mikrotvrdomosti jsou charakteristické vtláčovací silou $F < 2 \text{ N}$ a hloubku vtisku $h > 0,2 \text{ }\mu\text{m}$. K určení mikrotvrdomosti se využívají dva testy podle Vickerse a podle Knoop. K vyhodnocení zkoušek se využívá mikroskopu z důvodu malých rozměrů vtisku.

Vickersova zkouška mikrotvrdomosti je podobná zkoušce makrotvrdomosti, která byla vysvětlena v kapitole 4.1.1. Rozdíl je v použití nižšího rozsahu aplikované zatěžující síly.

Knoopův test využívá indentor v podobě kosočtverečného pyramidního jehlanu, který vytváří protáhlý vtisk ve tvaru kosočtverce. Poměr mezi dlouhými a krátkými úhlopříčkami je 7:1. [23]

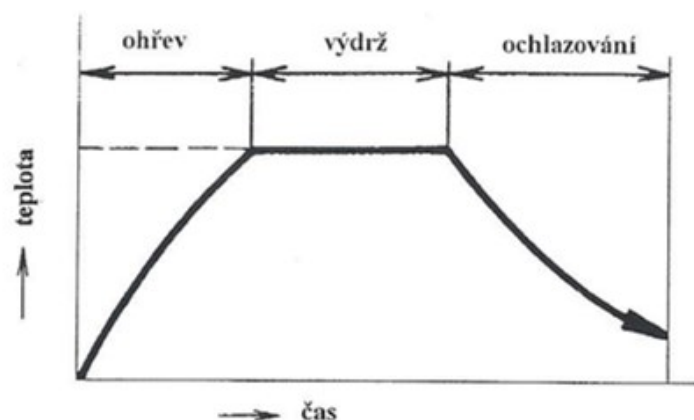


Obr. 31. Porovnání vtisku Knoopa a Vickerse [23]

5 TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

Během procesu tváření za studena dochází ke zpevňování materiálu a zrna se deformují ve směru tváření. Dochází k vytvoření textury. Zpevněním dochází ke změně mechanických vlastností. Zvyšuje se mez pevnosti a mez kluzu a zároveň klesá tažnost. S klesající hodnotou tažnosti klesá schopnost materiálu se dále deformovat. U složitých výtažku může nastat, že tažnost materiálu je spotřebována před dosažením finálního tvaru. U těchto výtažku se mezi jednotlivé tahy zařazuje mezioperační tepelné zpracování pro obnovení tažnosti materiálu. [25]

Tepelným zpracováním označujeme děj, při kterém se kontrolovaně mění teploty. Cílem procesu je dosažení požadovaným mechanických a technologických vlastností. Průběh tepelného zpracování se skládá z ohřevu na požadovanou teplotu, výdrží na této teplotě a následným ochlazením. [26]



Obr. 32. Průběh tepelného zpracování [26]

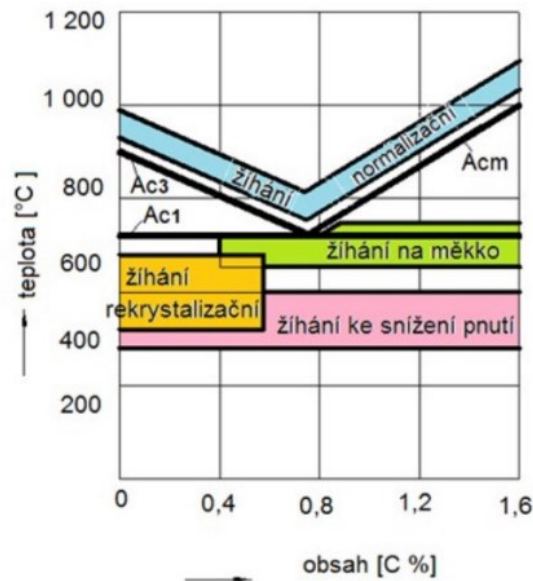
Druh tepelného zpracování je charakterizován způsobem ohřevu, teplotou ohřevu, dobou setrvání na této teplotě a rychlostí ochlazování. Základní druhy tepelného zpracování jsou kalení a žíhání. [26]

5.1 Žíhání

Žíhání je proces, kdy je součást rovnoměrně ohřáta na žíhací teplotu, následně je výdrž na této teplotě a pak následuje pomalé ochlazování. Cílem je odstranění vlivů jiných operací, jako např. tváření, svařování, zlepšení obrobitelnosti, zmenšení vnitřního pnutí apod.

Podle teploty lze žíhání rozdělit na žíhání bez překrytí (teplota žíhání nepřekročí překrytí teplotu A_{c1}) a na žíhání s překrytím (teplota žíhání překročí teplotu A_{c1} ,

A_{c3} nebo A_{cm}). Dále se žíhání dělí na normalizační, na měkko, rekrytalizační a ke snížení pnutí. [26, 27]



Obr. 33. Oblasti žihacích teplot v rovnovážném diagramu $Fe - Fe_3C$ [26]

5.1.1 Normalizační žíhání

Jedná se o způsob žíhání, při kterém dochází k překrytalizaci. Žihací teplota je v rozmezí 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} nebo A_{cm} . Následuje dostatečně dlouhá výdrž na této teplotě, aby se dosáhlo homogenního austenitu. Následné chlazení probíhá na klidném vzduchu.

Výsledkem je jemnozrnná struktura a zvýšení pevnosti. Normalizační žíhání odstraňuje nerovnoměrnou strukturu, která vznikla předchozím tvářením nebo odléváním. [26, 27]

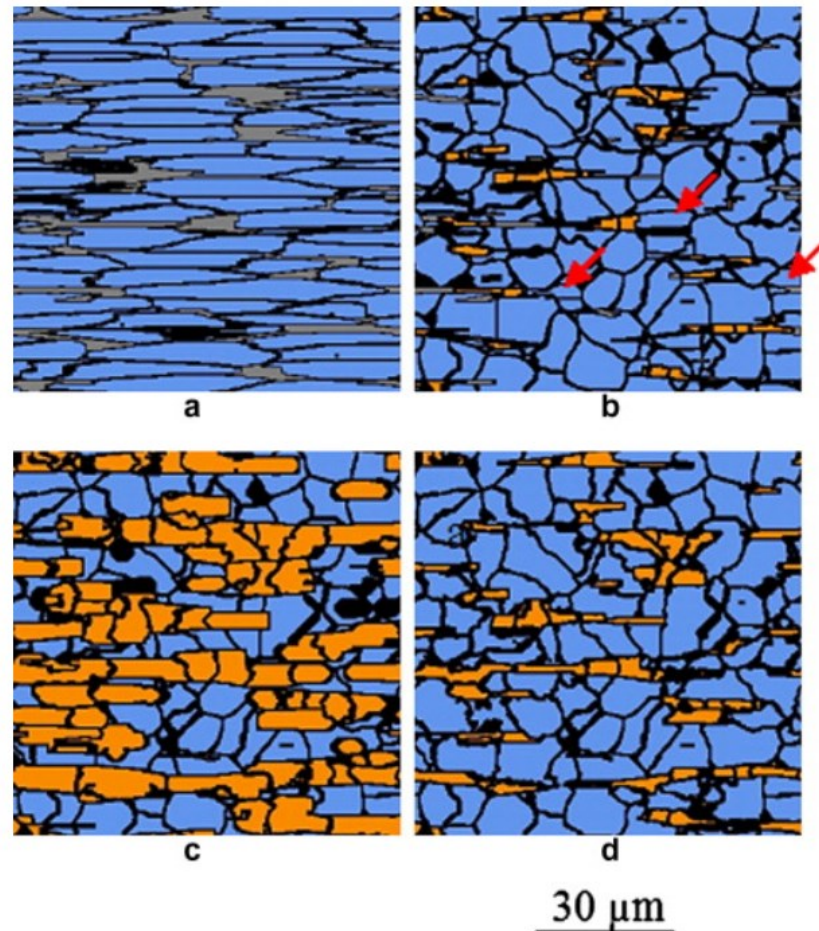
5.1.2 Žíhání na měkko

Cílem žíhání na měkko je snížení tvrdosti a tím zlepšení obrobiteľnosti. Žihací teplota se pohybuje mírně pod nebo mírně nad teplotou A_{c1} . Výdrž v případě žíhání na měkko se pohybuje v rozmezí 2 až 8 hodin s následným pomalým ochlazováním v peci. [26]

5.1.3 Rekrytalizační žíhání

Rekrytalizační žíhání obnovuje tvárné vlastnosti materiálu a odstraňuje protažení zrn a zpevnění způsobené tvářením. Používá se jako mezioperační žíhání při tvářením za studena. Proces se skládá z ohřevu na rekrytalizační teplotu, která se v závislosti na materiálu pohybuje v rozmezí 550 až 700 °C, z krátké výdrže (cca 1 hod) a následným ochlazením. Teplota rekrytalizačního žíhání závisí na velikosti předchozí deformace a na požadované

velikosti zrn. Obecně platí zásada, že čím větší je stupeň předchozí deformace, tím nižší je rekrytalizační teplota. Během procesu se využívá ochranná atmosféra, aby nedocházelo k oxidaci povrchu materiálu. [26, 27, 28]



Obr. 34. Vývoj struktury během žihání [28]

a) počáteční struktura, b) struktura na počátku tvorby austenitu,
c) struktura před ochlazováním, d) struktura na konci žihání

5.1.4 Žihání ke snížení pnutí

Cílem tohoto tepelného zpracování je snížení zbytkových vnitřních pnutí, které vznikly při předchozím zpracování (tuhnutí, tepelné zpracování, mechanické opracování, svařování apod.). Při žihání nedochází ke změně struktura a mechanických vlastností.

Žihací teplota je v rozmezí 450 až 650 °C (závisí na druhu materiálu). Výdrž na teplotě je obvykle 1 až 2 hodiny s následným velmi pomalým chlazením na vzduchu. [27]

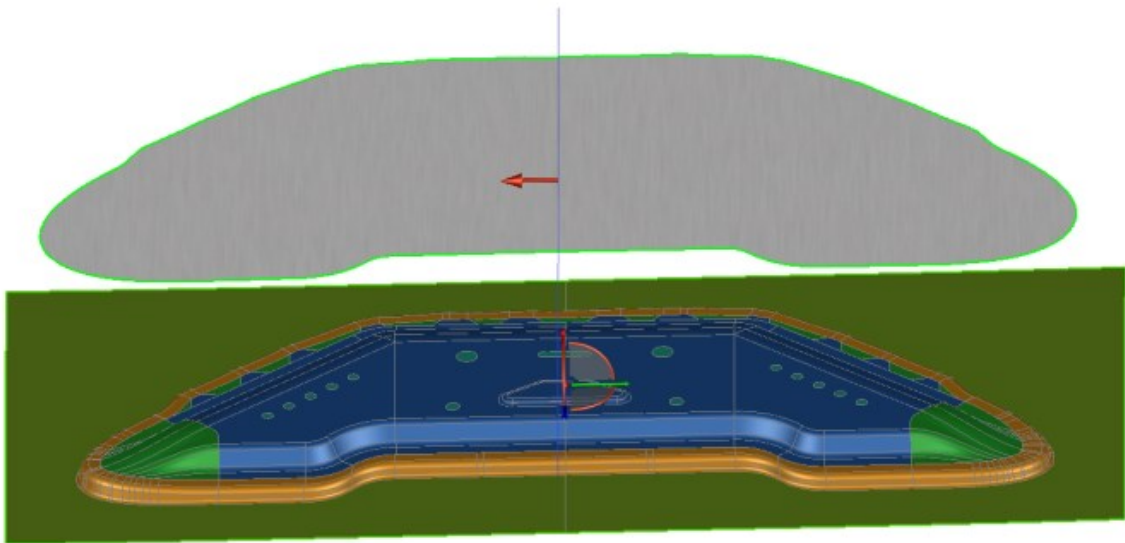
6 SIMULOVÁNÍ PROCESU TVÁŘENÍ

Počítačové programy pro simulování tvářecích procesů v oblasti zpracování plechů jsou v současné době pro průmysl velmi důležitým nástrojem, který umožňuje na základě zvolených procesních parametrů přesně předpovídat geometrické vlastnosti dílů a charakteristiky po tváření (např. zbytkové napětí) a možné vady a poruchy. Díky těmto předpovědím se dělají zásadní rozhodnutí při návrhu procesu, která silně ovlivňují technický a ekonomický úspěch procesu, jako je výběr vhodného technologického postupu, návrh nástrojů a jejich řízení. [29]

V současné době automobilový průmysl pokračuje ve vývoji numerické simulace procesů tváření plechů díky přísným ekologickým a bezpečnostním normám, které vedly k vývoji materiálů s lepším poměrem pevnosti k hmotnosti nebo novým tvářecím procesům. Nově zavedené materiály umožňují vyrábět komponenty z tenčích plechů při zachování uspokojivé pevnosti a tuhosti, což v konečném důsledku vede ke snížení hmotnosti konstrukce, což je zásadní krok ke splnění stále přísnějších norem bezpečnosti cestujících a emisí. Zvýšení mechanické pevnosti kovových materiálů je však doprovázeno snížením jejich tažnosti. To představuje nové výzvy pro předvídaní tvarových vad, proto je vývoj numerické simulace hojně podporován. [30]

6.1 Analýza

Tvorba analýzy spočívá v přesném nadefinování určitých parametrů. Čím přesněji se nadefinuje proces při nastavování simulace, tím přesnější pak bude v porovnání s reálným procesem. První krok při tvorbě simulace spočívá ve vytvoření sítě (tzv. síťování). Tento krok rozdělí díl na jednotlivé elementy, které jsou matematicky snadno vyjádřitelné. Dalším krokem je přiřazení materiálu. Materiál se obvykle vybírá z databáze, která obsahuje mechanické vlastnosti (mez pevnosti, tažnost, modul pružnosti, poissonovu konstantu aj.) daného materiálu. Následně se definují procesní podmínky jako stoj, sled operací, tažník, přidržovač, přístřih plechu, brzdy a mazání. [31, 32, 33]



Obr. 35. Nadefinovaný tažník a přístřih plechu

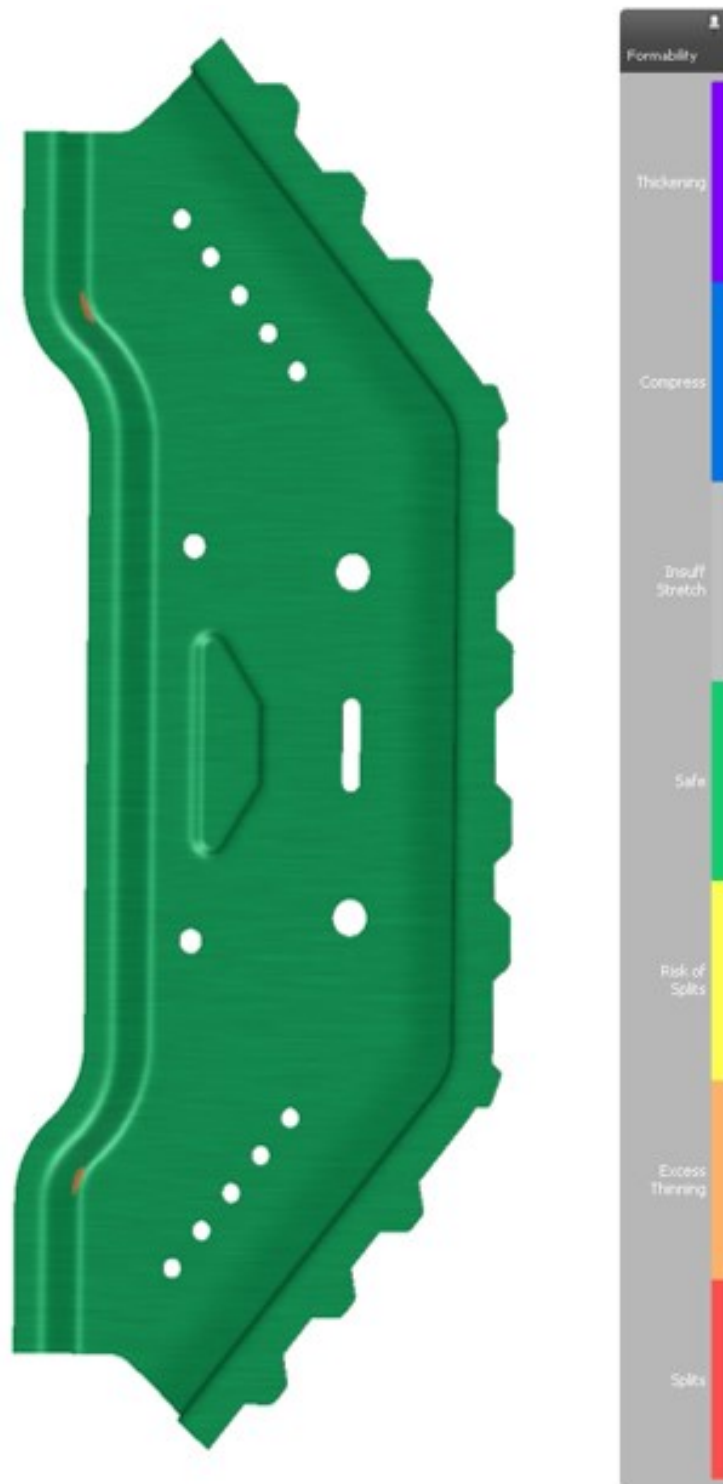
6.2 Výsledky analýz

Výsledky simulace predikují chování materiálu během procesu tváření a výsledek tváření. Mezi výsledky tváření patří lisovatelnost, ztenčení, zvlnění a vtažení. Tyto výsledky se využívají k optimalizaci procesu. [32, 34]

6.2.1 Lisovatelnost (Formability)

Lisovatelnost zobrazuje přetvoření výtažku. Cílem je dosažení co nejvyššího stupně přetvoření, které eliminuje nežádoucí efekt odpružení a zvyšuje pevnost. Naopak nežádoucí jsou jevy jako roztržení materiálu (Splits), příliš velké ztenčení (Thinning), stlačení (Compress) a pěchování (Thickening).

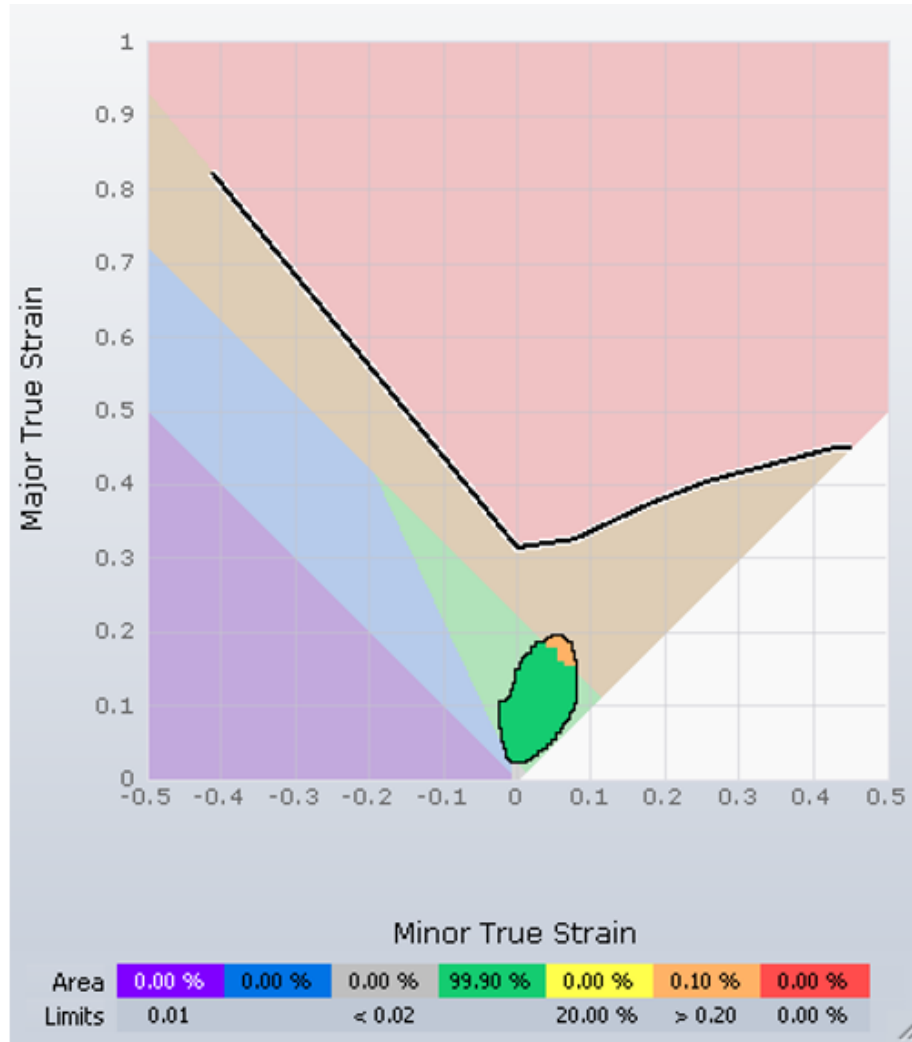
V případě softwaru AutoForm je výsledek znázorněn barevnou škálou na dílci a procentuálním vyjádřením dané oblasti. Roztržení materiálu je znázorněno červenou barvou, příliš velké ztenčení barvou oranžovou, riziko vzniku trhlin barvou žlutou, stlačení barvou modrou a pěchování barvou fialovou. Zelená barva znázorňuje bezpečnou oblast a cílem je, aby procento této oblasti bylo co největší. Barva šedá zobrazuje místa, kde není využitý potenciál materiálu a materiál je nevyužitý. [32, 35]



Obr. 36. Výsledek lisovatelnosti v softwaru AutoForm

Výsledek lisovatelnosti je dále zobrazen v diagramu mezní tvářitelnosti. V souřadném systému představujícím hlavní poměrná nebo logaritmická přetvoření ε_1 a ε_2 , respektive θ_1 a θ_2 jsou zkonstruovány křivky, které představují hranici mezi bezpečnou zónou a zónou porušení materiálu. Kromě základních křivek zobrazujících hranici porušení materiálu (vznik trhlin) lze v diagramu určit oblasti dalších vad. Do diagramu se zakreslují body

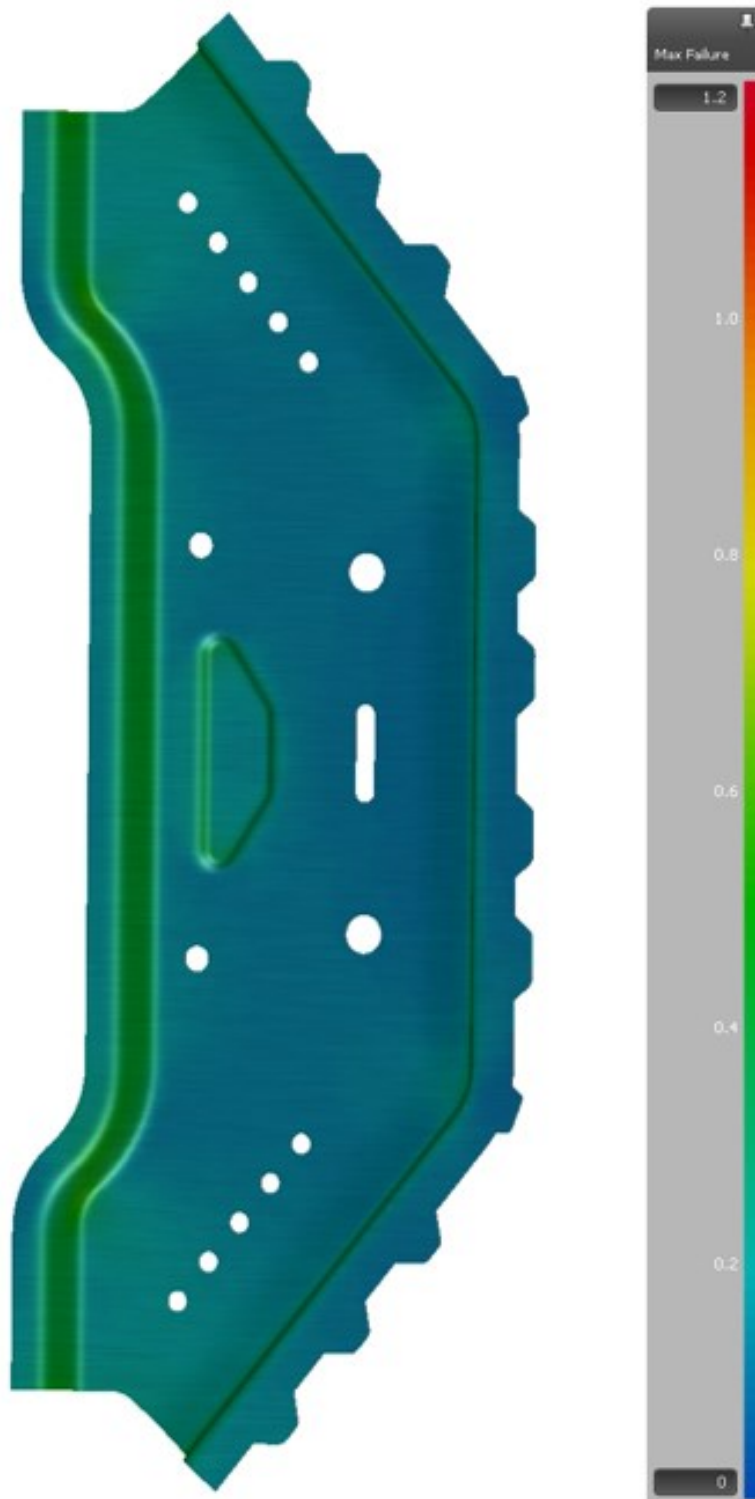
(hodnoty), které znázornují hlavní přetvoření na daných místech výlisku. Podle umístění bodů v diagramu lze identifikovat místa s nevyhovující napjatostí, kritickým ztenčením plechu nebo porušením materiálu. [36]



Obr. 37. Diagram mezní tvářitelnosti v softwaru AutoForm

6.2.2 Porušení (Max Failure)

Analýza zobrazuje místa, která jsou nejnáchylnější na porušení. Hraniční hodnota je 1 neboli 100 %. V praxi se se jako hraniční hodnota používá hodnota 0,8 z důvodu rezervy. [35]



Obr. 38. Výsledek porušení v softwaru AutoForm

6.2.3 Zvlnění (Wrinkling)

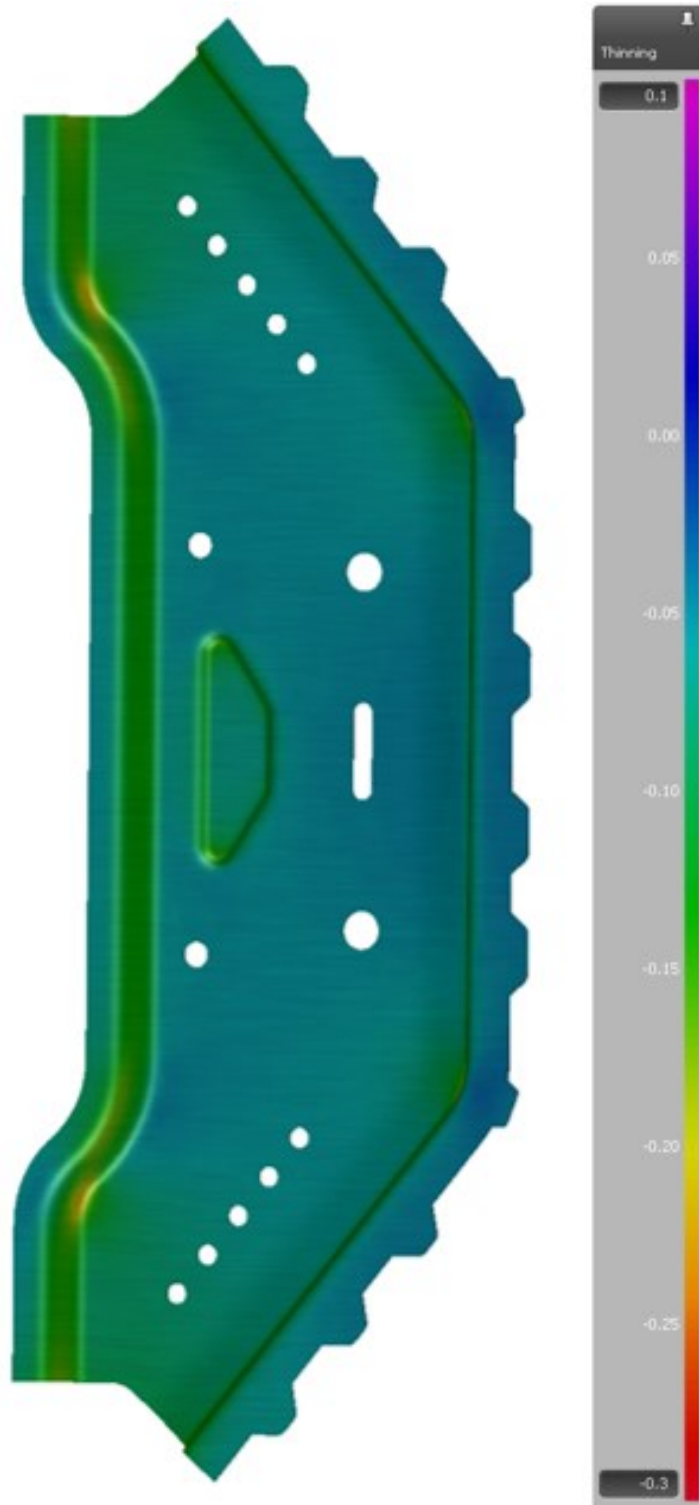
Zvlnění vzniká v místech, kde dojde k napěchování materiálu. Při hlubokém tažení materiálu se v jednom místě tloušťka plechu zmenší a v jiném zvětší, což zapříčiňuje právě zvlnění. [32, 35]



Obr. 39. Výsledek zvlnění v softwaru AutoForm

6.2.4 Ztenčení (Thinning)

Výsledek analýzy zobrazuje procentuální ztenčení plechu výtažku. Záporné hodnoty zobrazují ztenčení a kladné napěchování v daném místě. Hraniční hodnota je 25 %, ale už při 20 % se doporučuje povést optimalizaci procesu. [32, 35]



Obr. 40. Výsledek ztenčení v softwaru AutoForm

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 STANOVENÍ CÍLŮ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Hlavní cíle diplomové práce byly stanoveny tyto:

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.

Teoretická část diplomové práce měla za úkol přiblížit danou problematiku. Byla rozdělena do šesti kapitol, které se věnují teoretickému základu pro lepší pochopení a správné vypracování praktické části. Kapitoly se věnovaly procesu tváření, materiálům vhodným k plošnému tváření, technologickým a mechanickým zkouškám, tepelnému zpracování a simulacím procesu tváření.

Cílem praktické části byla volba plechů různých tloušťek a různých materiálů, vytažení vzorků na zařízení BUP 600, měření změny mechanických vlastností vlivem procesu hlubokého tažení a vyhodnocení těchto změn. Dále byly vytvořeny simulace v softwaru AutoForm R8, které sloužily k porovnání výsledků simulace a reálných výsledků.

8 VOLBA PLECHŮ

Cílem diplomové práce bylo hluboké tažení plechů s následným měřením změny mechanických vlastností vlivem tohoto procesu. Prvním krokem bylo zvolit vhodné materiály plechů pro hluboké tažení a tloušťky jednotlivých plechů. Tloušťky plechů byly zvoleny 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm.

8.1 Materiál

Pro výrobu vzorků procesem hlubokého tažení plechů byla zvolena nízkouhlíková ocel DC03 a nerezová ocel EN 1.4306.

8.1.1 Materiál DC03

Prvním zvoleným materiálem byla ocel s označením DC03. Jedná se o materiál vykazující vynikající schopnost hlubokého tažení. Tato ocel je vhodná pro tváření s požadavky na hluboké tažení a obtížné profilování. Tab. 5. zobrazuje chemické složení materiálu.

Tab. 5. Chemické složení oceli DC03 [37]

Chemické složení DC03			
Obsah prvků – ve hmotnosti [% max]			
C	Mn	P	S
0,1	0,45	0,035	0,035

Tab. 6. zobrazuje důležité mechanické vlastnosti oceli DC03 pro proces hlubokého tažení. Mezi významné mechanické vlastnosti spadá hodnota meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti v tahu R_m a hodnota tažnosti A_{80} .

Tab. 6. Mechanické vlastnosti oceli DC03 [37]

Mechanické vlastnosti DC03		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
240	270–370	34

8.1.2 Materiál 1.4306

Druhým zvoleným materiálem byla nerezová ocel s označením EN 1.4306. Jedná se o austenitickou nerezovou ocel určenou k tváření. Tab. 7. zobrazuje chemické složení materiálu.

Tab. 7. Chemické složení oceli EN 1.4306 [38]

Chemické složení EN 1.4306							
Obsah prvků – ve hmotnosti [% max]							
C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	N
0,03	2	0,045	0,015	1	20	12	0,11

Tab. 8. zobrazuje důležité mechanické vlastnosti oceli EN 1.4306 pro proces hlubokého tažení. Mezi významné mechanické vlastnosti spadá hodnota meze kluzu $R_{p0,2}$, meze pevnosti v tahu R_m a hodnota tažnosti A_{80} .

Tab. 8. Mechanické vlastnosti oceli EN 1.4306 [38]

Mechanické vlastnosti EN 1.4306		
$R_{p0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]	A_{80} [%]
180	460–680	35

9 VÝROBA DÍLŮ HLUBOKÝM TAŽENÍM

Dílčím cílem diplomové práce bylo výroba dílů hlubokým tažením. K výrobě dílů byly použity plechy z nízkouhlíkové oceli DC03 a z nerezové oceli EN 1.4306. Tyto materiály jsou popsány v kapitole 8. U obou materiálů byly zvoleny plechy o tloušťce plechu 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. Pro hluboké tažení byly zvoleny dva druhy tahu. Prvním druhem tahu byla metoda podle Erichseny s průměrem tažníku 18 mm. Druhým druhem tahu byla zvolena metoda Nakajima s průměrem tažníku 60 mm. Metoda Nakajima v porovnání s metodou podle Erichseny navíc obsahovala brzdící drážku. Pro každou metodu a každý plech byly vyhotoveny tři tahy. K výrobě dílů hlubokým tažením byl využit stroj BUP 600 od firmy Zwick/Roell.

9.1 BUP 600

Zařízení BUP 600 od firmy Zwick/Roell slouží k testování hlubokotažnosti plechů (Erichsenova zkouška, Nakajima, aj.). Dále lze na stroji testovat vliv povrchových úprav, povlaků, maziv, vliv nástrojů a parametrů metody při procesu tváření. Základní parametry zařízení BUP 600 zobrazuje Tab.9.

Tab. 9. Základní parametry zařízení BUP 600 Zwick/Roell [39]

BUP 600 Zwick/Roell	
Maximální síla	600 kN
Maximální tloušťka plechu	10 mm
Maximální zkušební průměr	250 mm

Tažník zařízení BUP 600 provádí pohyb zesponu směrem nahoru. Tato část zařízení je zakrytována z důvodu bezpečnosti. Zařízení je připojeno k počítači, který slouží zpracovává a vyhodnocuje dat.



Obr. 41. Zařízení BUP 600 Zwick/Roell

Postup tažení výtazku spočívá ve vložení přístřihu plechu do prostoru tažníku. Následně se pomocí ovládacích tlačítek plech sevře mezi tažnici a přidržovač na požadovanou přidržovací sílu. Potom se pomocí tlačítka START spustí samotný tah.



Obr. 42. Vlevo prostor tažníku, vpravo ovládaní BUP 600

9.2 Tažené vzorky

K výrobě vzorků byly použity plechy z nízkouhlíkové oceli DC03 o tloušťce 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm a plechy z nerezové oceli EN 1.4306 o tloušťce 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. Z každého plechu byly vyhotoveny tři vzorky metodou podle Erichsena s průměrem tažníku 18 mm a tři vzorky metodou Nakajima s brzdící drážkou a s průměrem tažníku 60 mm.

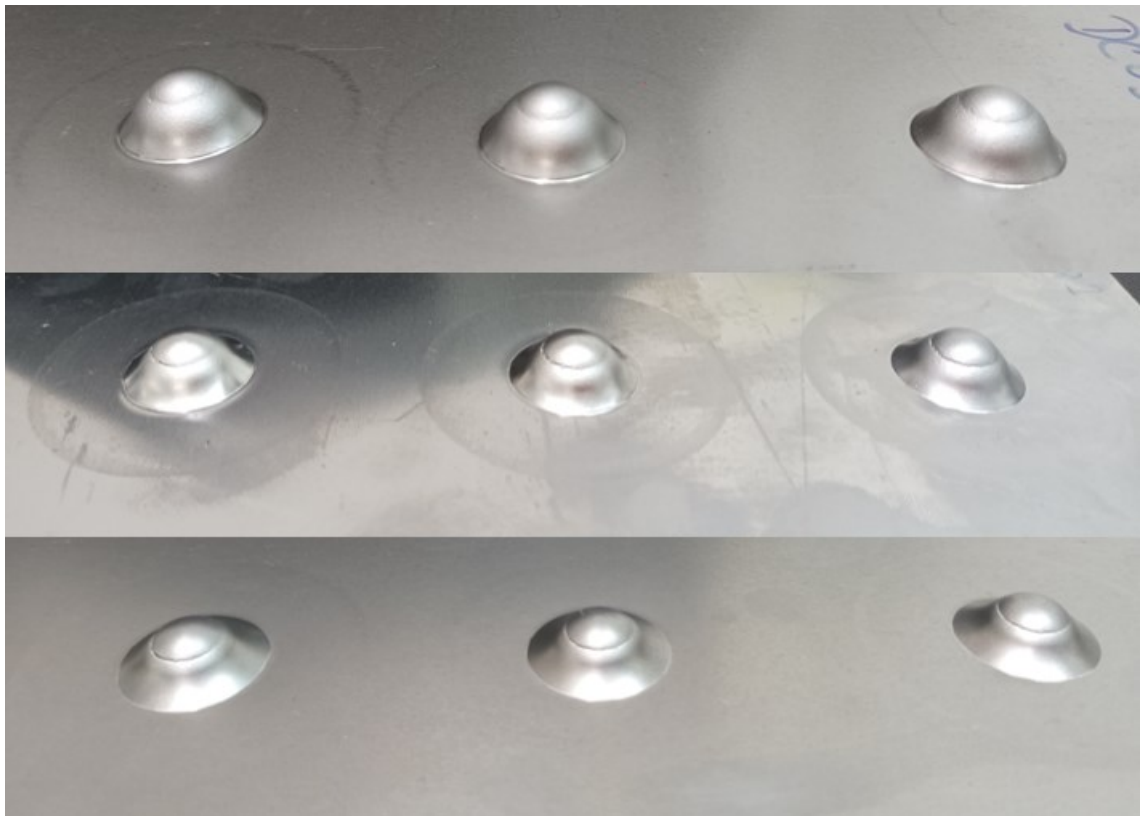
9.2.1 Metoda podle Erichsena

Pro tažení vzorků metodou podle Erichsena byl využit tažník průměru 18 mm. Na zařízení BUP 600 byly nastaveny parametry, které jsou zobrazeny v Tab. 10.

Tab. 10. Parametry metody podle Erichsena

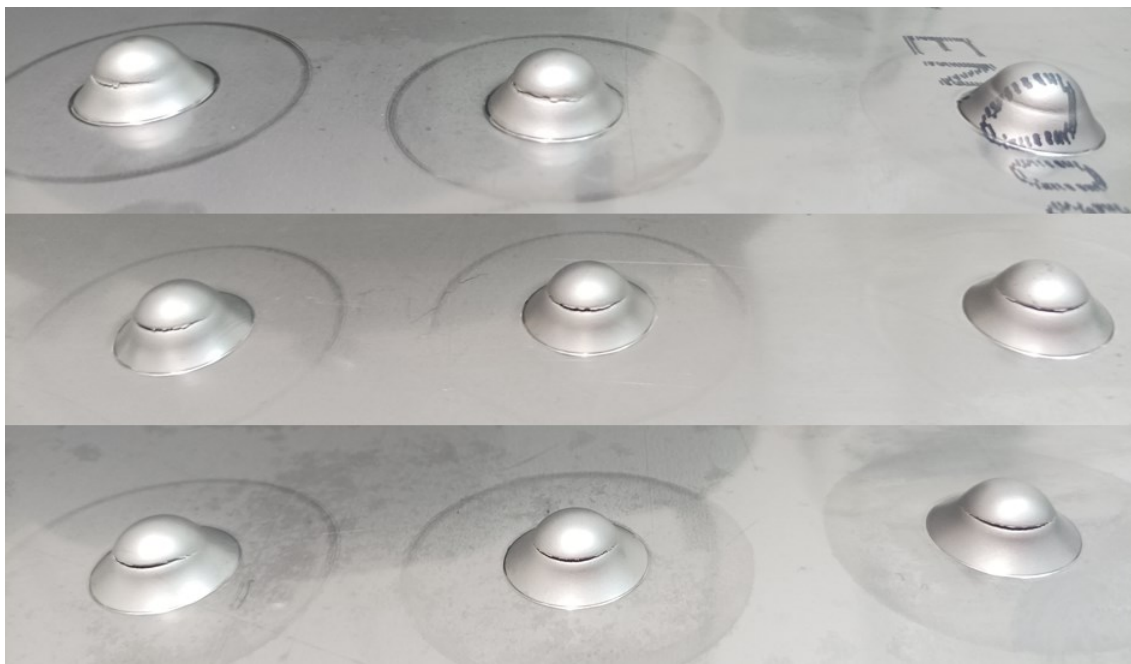
Metoda podle Erichsena	
Maximální síla	200 kN
Rychlost	0,5 mm/s
Přidržovací síla	30 kN

Po nastavení základních parametru následovalo tažení jednotlivých vzorků. Metodou podle Erichsena bylo vytaženo celkem 9 vzorků pro ocel DC03, a to tak že 3 vzorky z každé tloušťky plechu.



Obr. 43. Vytažené vzorky materiálu DC03
Shora plech 1,5 mm, plech 1,0 mm a plech 0,5 mm

Stejně jako pro materiál DC03 bylo vyrobeno 9 vzorků pro materiál EN 1.4306.



*Obr. 44. Vytažené vzorky materiálu EN 1.4306
Shora plech 1,5 mm, plech 1,0 mm a plech 0,5 mm*

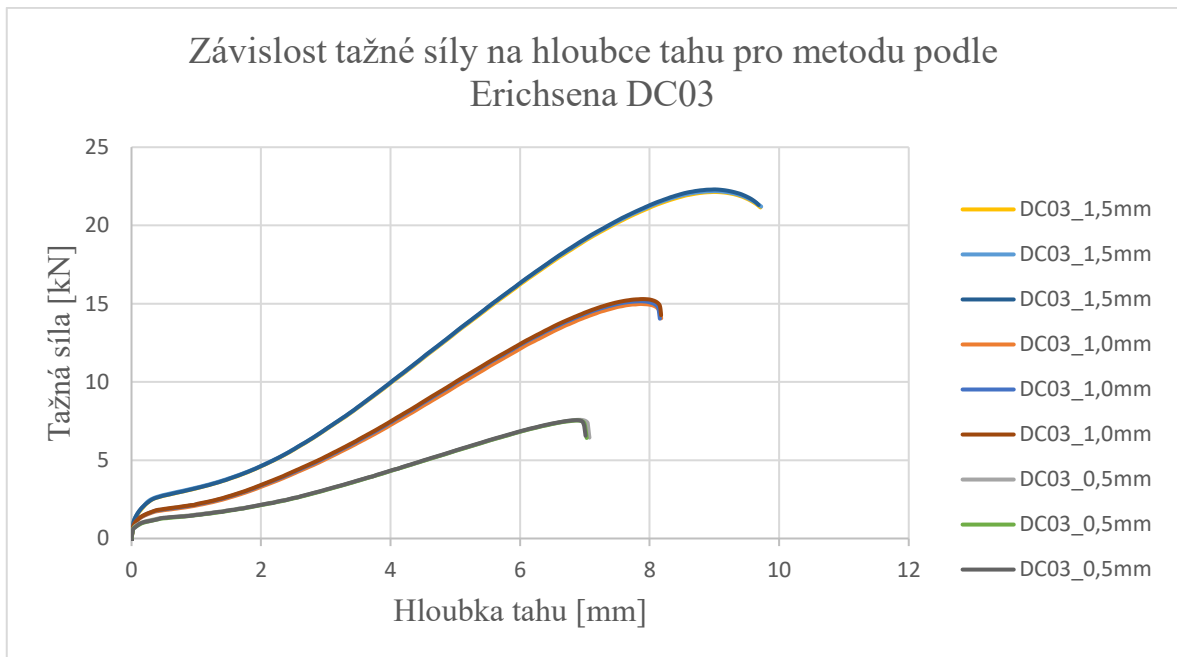
Výsledky zkoušek byly zaznamenány softwarem testXpert III od firmy Zwick/Roell. Pro každý tah byl vyhodnocen parametr síla, při které došlo k porušení F_{Break} a hloubka tahu při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Tyto parametry jsou zobrazeny v Tab. 11. pro všechny tahy metodou podle Erichsena.

V Tab. 11. lze vidět že u obou materiálů s rostoucí tloušťkou plechu roste síla při které došlo k porušení F_{Break} i hloubka tahu při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Dále je zřejmé že hodnota síla, při které došlo k porušení F_{Break} je v případě materiálu EN 1.4306 zřetelně vyšší v porovnání s materiálem DC03. Zatímco hodnota hloubky tahu, při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$ v případě tloušťky plechu 1,5 mm je téměř stejná u obou materiálů. U tlouštěk plechu 1,0 mm a 0,5 mm dosahuje vyšších hodnot materiál EN 1.4306.

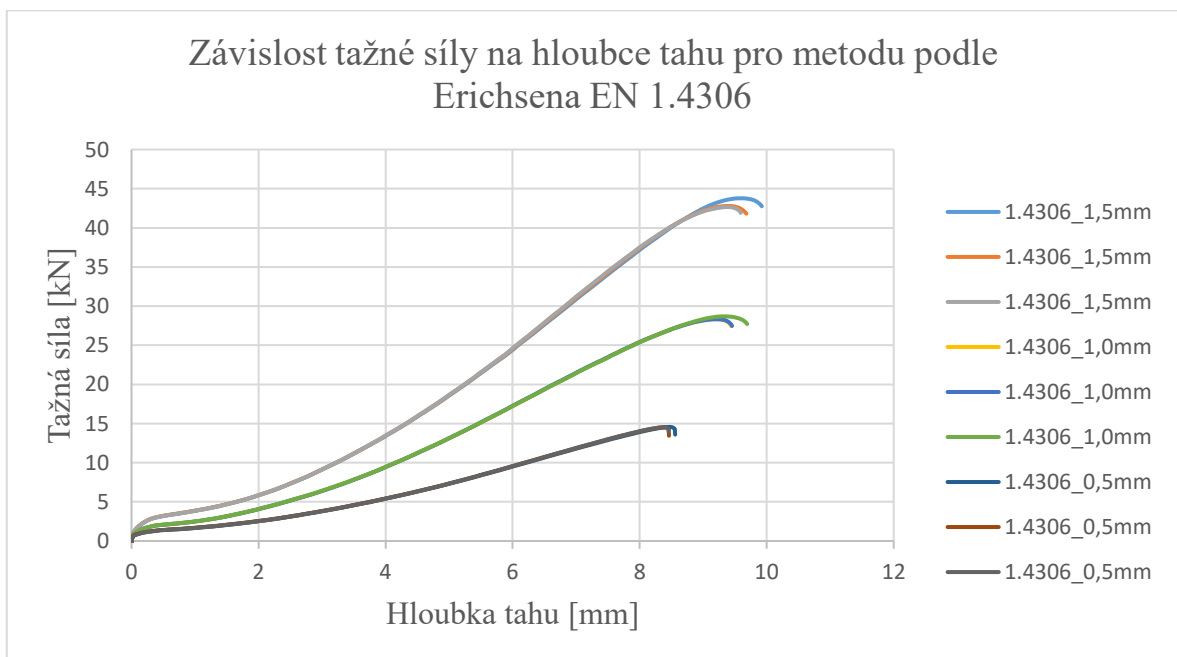
Tab. 11. Výsledné parametry jednotlivých tahů metodou podle Erichsena

Metoda podle Erichsena			
Materiál	Tloušťka plechu	F _{Break} [kN]	Travel _{Break} [mm]
DC03	1,5	21,187	9,729
	1,5	21,124	9,717
	1,5	21,278	9,691
	1,0	13,865	8,184
	1,0	14,043	8,158
	1,0	14,266	8,177
	0,5	6,445	7,071
	0,5	6,421	7,029
	0,5	6,380	7,016
EN 1.4306	1,5	42,760	9,924
	1,5	41,763	9,687
	1,5	40,084	9,597
	1,0	27,027	9,446
	1,0	26,886	9,460
	1,0	27,668	9,698
	0,5	12,840	8,565
	0,5	13,441	8,462
	0,5	13,087	8,465

Dalším výstupem ze zařízení BUP 600 jsou data tažné síly v závislosti na hloubce tažení. Tato závislost je zobrazena na Obr. 45. pro materiál DC03 a Obr. 46. pro materiál EN 1.4306. Při tažení plechu dochází k postupnému růstu tažné síly do okamžiku vzniku trhliny, kdy dojde k poklesu tažné síly. Velikost zaznamenaného poklesu závisí na nastavení citlivosti pro detekci vzniku trhliny. Tento parametr byl nastaven na 1 000 N.



Obr. 45. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu podle Erichsena DC03



Obr. 46. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu podle Erichsena EN 1.4306

9.2.2 Metoda Nakajima

Metoda Nakajima využívá tažník o průměru 60 mm a v porovnání s metodou podle Erichsena používá brzdící drážku. Na zařízení BUP 600 byly nastaveny parametry, které jsou zobrazeny v Tab. 12.

Tab. 12. Parametry metody Nakajima

Metoda Nakajima	
Maximální síla	400 kN
Rychlost	0,5 mm/s
Přidržovací síla	250 kN

Po nastavení základních parametru následovalo tažení jednotlivých vzorků. Metodou Nakajima bylo vytaženo celkem 9 vzorků pro ocel DC03, a to tak že 3 vzorky z každé tloušťky plechu.



Obr. 47. Vytažené vzorky materiálu DC03
Shora plech 1,5 mm, plech 1,0 mm a plech 0,5 mm

Stejně jako pro materiál DC03 bylo vyrobeno 9 vzorků pro materiál EN 1.4306.



*Obr. 48. Vytažené vzorky materiálu EN 1.4306
Shora plech 1,5 mm, plech 1,0 mm a plech 0,5 mm*

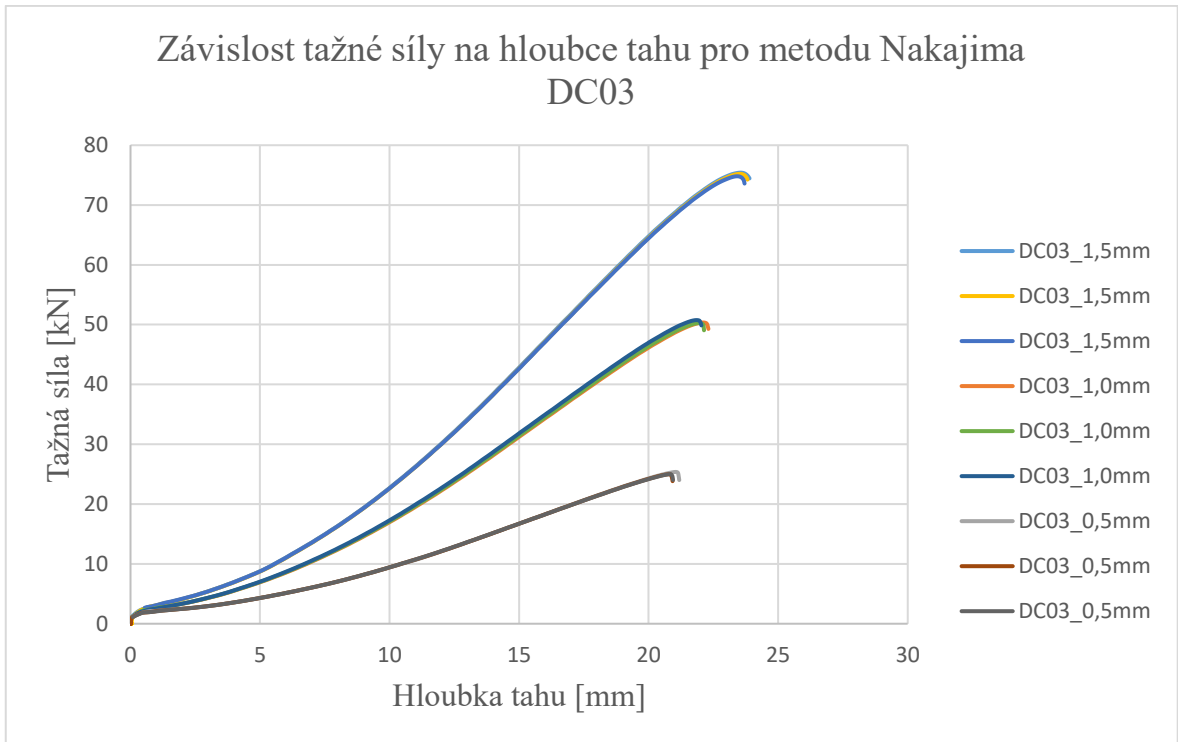
Výsledky zkoušek byly zaznamenány softwarem testXpert III od firmy Zwick/Roell. Pro každý tah byl vyhodnocen parametr síla, při které došlo k porušení F_{Break} a hloubka tahu při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Tyto parametry jsou zobrazeny v Tab. 13. pro všechny tahy metodou Nakajima.

V Tab. 13. lze vidět že u obou materiálů s rostoucí tloušťkou plechu roste síla při které došlo k porušení F_{Break} i hloubka tahu při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Dále je zřejmé že hodnota síla, při které došlo k porušení F_{Break} je v případě materiálu EN 1.4306 zřetelně vyšší v porovnání s materiálem DC03. Stejně tak hodnota hloubky tahu, při které došlo k porušení $\text{Travel}_{\text{Break}}$ je v případě materiálu EN 1.4306 vyšší v porovnání s materiálem DC03.

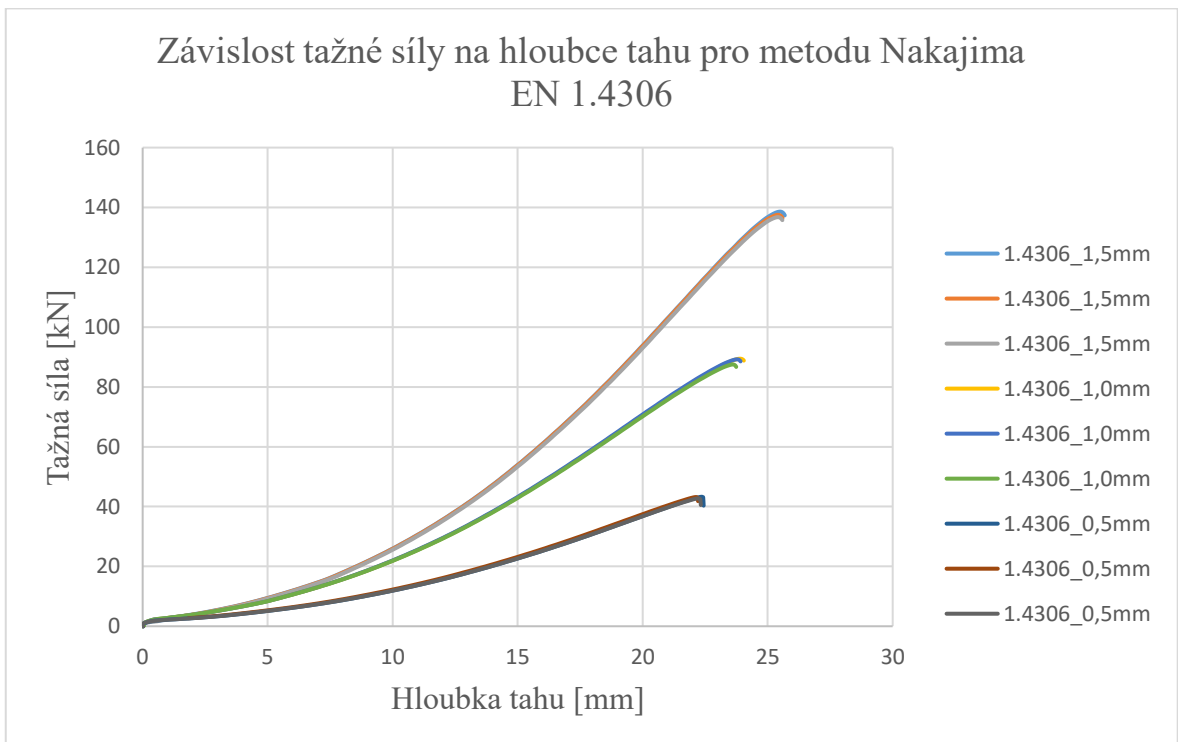
Tab. 13. Výsledné parametry jednotlivých tahů metodou Nakajima

Metoda Nakajima			
Materiál	Tloušťka plechu	F _{Break} [kN]	Travel _{Break} [mm]
DC03	1,5	74,243	23,917
	1,5	73,063	23,838
	1,5	73,577	23,705
	1	49,281	22,309
	1	49,048	22,139
	1	49,185	22,058
	0,5	24,014	21,184
	0,5	23,832	20,927
	0,5	23,258	20,962
EN 1.4306	1,5	137,359	25,685
	1,5	136,474	25,595
	1,5	135,765	25,588
	1	85,579	24,067
	1	82,696	23,935
	1	81,307	23,763
	0,5	40,327	22,439
	0,5	41,831	22,215
	0,5	40,526	22,326

Dalším výstupem ze zařízení BUP 600 jsou data tažné síly v závislosti na hloubce tažení. Tato závislost je zobrazena na Obr. 49. pro materiál DC03 a Obr. 50. pro materiál EN 1.4306. Při tažení plechu dochází k postupnému růstu tažné síly do okamžiku vzniku trhliny, kdy dojde k poklesu tažné síly. Velikost zaznamenaného poklesu závisí na nastavení citlivosti pro detekci vzniku trhliny. Tento parametr byl nastaven na 1 000 N.



Obr. 49. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu Nakajima DC03



Obr. 50. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu Nakajima EN 1.4306

10 SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ

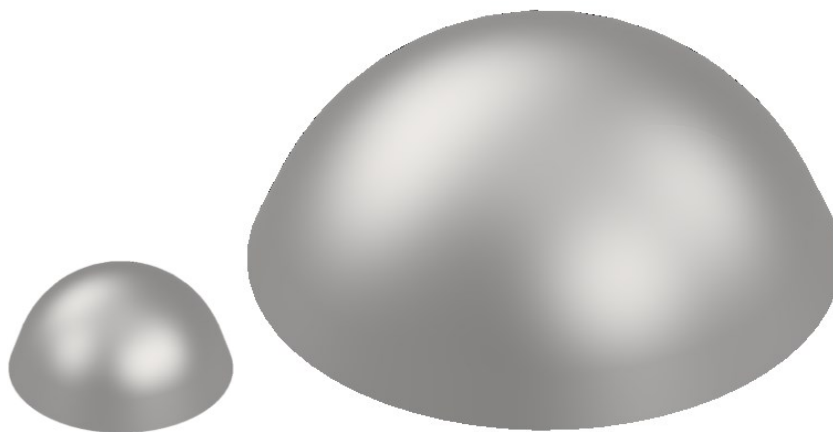
V této kapitole diplomové práce byly popsány simulace k jednotlivým tahům, a to konkrétně jejich nastavení a výsledky. Samotné výsledky pak budou sloužit jako porovnání s reálnými procesy tažení. Simulace byly vytvořeny v softwaru AutoForm R8.

10.1 Nastavení simulací

Pro metodu podle Erichsena bylo zhotoveno celkem 6 simulací, a to pro každou tloušťku plechu a každý materiál. Stejným způsobem byly vytvořeny simulace pro metodu Nakajima. Níže budou prezentovány výsledky jednotlivých simulací a porovnání s reálným procesem tažení. Postup nastavení simulace bude popsán pouze pro jeden případ, protože v nastavení simulací se liší pouze importované díly, nastavení tloušťky plechu a materiálu.

10.1.1 Model součásti

Modely pro simulaci byly vymodelovány v softwaru Autodesk Inventor Professional 2023. Následně byly uloženy ve formátu STEP. Součásti byly zhotoveny podle rozměrů reálných tahů.

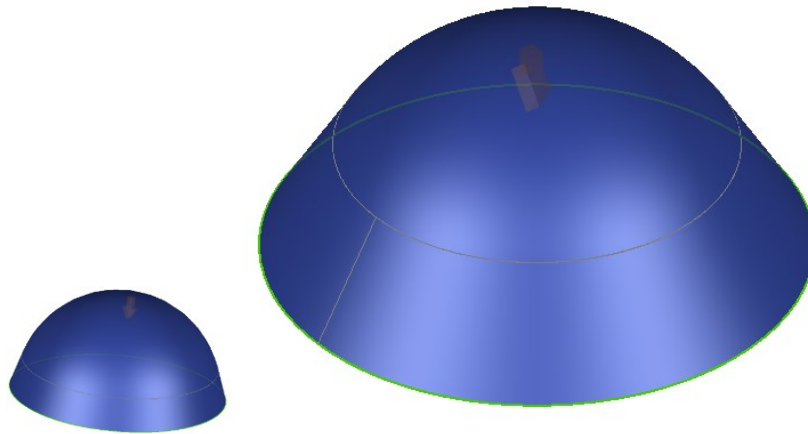


Obr. 51. Modely dílů

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

10.1.2 Import součásti

Vytvořený model ve formátu STEP byl naimportován do softwaru Autoform R8. Následně se nastavil směr tažení.

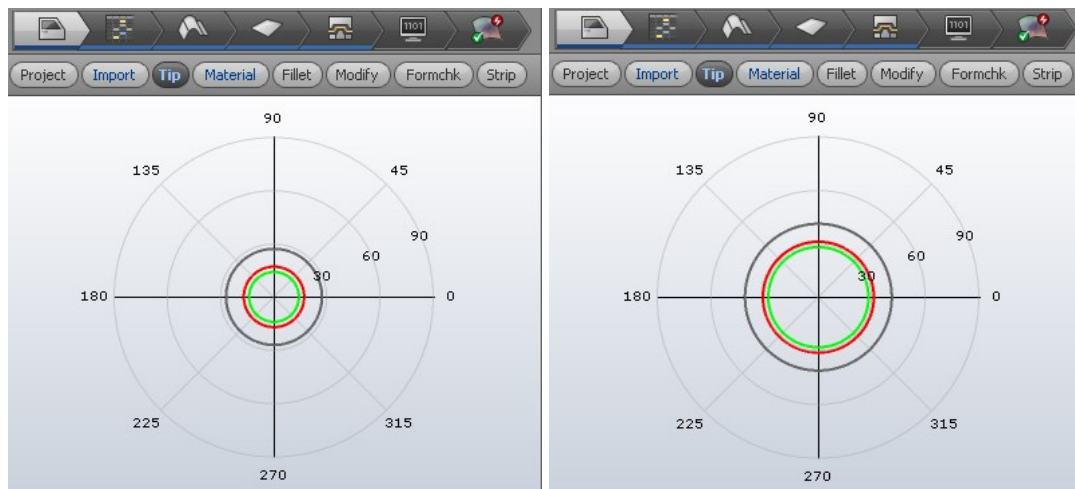


Obr. 52. Import dílu a určení směru tažení

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

10.1.3 Zorientování dílu

Po vložení součásti do programu Autoform R8 byla součást zorientována na střed souřadného systému. Toho bylo dosaženo funkcí Automatic Tipping.

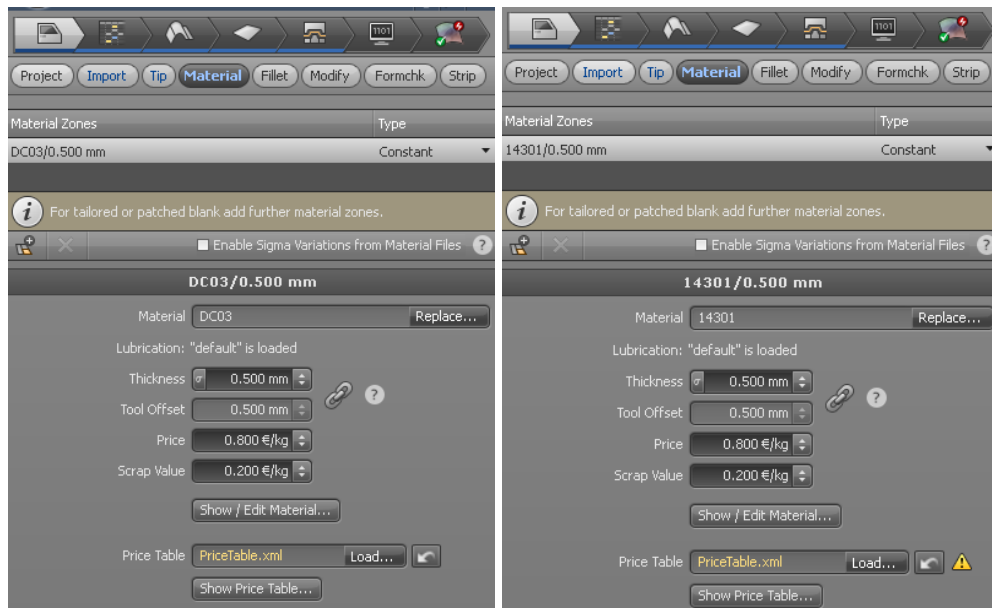


Obr. 53. Automatic Tipping

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

10.1.4 Přiřazení materiálu

AutoForm R8 obsahuje databázi materiálů, takže k dílu stačilo přiřadit daný materiál. Materiál DC03 je přímo nacházel v databázi. V případě materiálu EN 1.4306 se volila alternativa, která nejvíce odpovídala tomuto materiálu. Zároveň s volbou materiálu byla zadána tloušťka dílu.

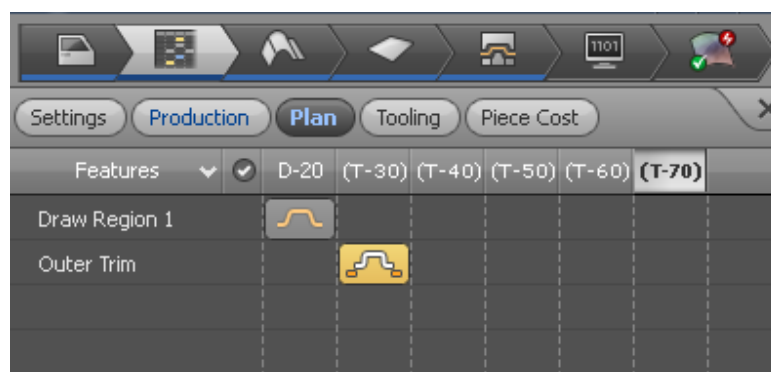


Obr. 54. Přřazení materiálu a zadání tloušťky dílu
Vlevo materiál DC03, vpravo materiál EN 1.4306

10.1.5 Výrobní plán

Výrobní plán obsahuje pouze operaci hlubokého tažení D-20. Ostřížení okrajů T-30 bylo vynecháno, protože ani v reálném procesu k němu nedochází. Vytažené vzorky slouží k rozřezání a následnému vyhodnocení mechanických vlastností.

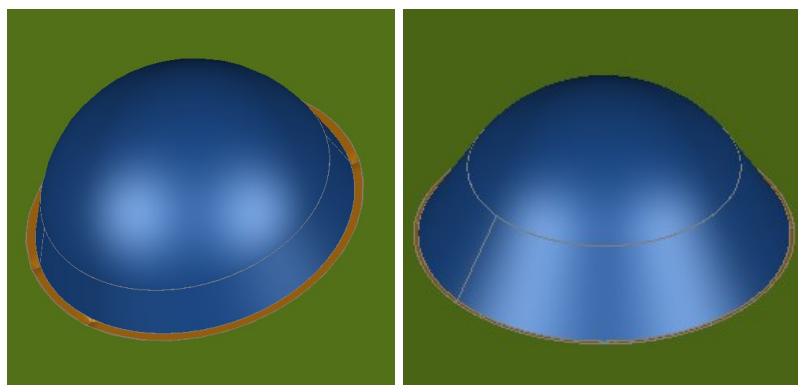
Současně s výrobním plánem byl zvolen tvářecí stroj. Stejně jako u materiálů AutoForm R8 obsahuje databázi tvářecích strojů. Výtažky byly v zhotoveny na stroji BUP 600, ten se však v databázi nenachází, takže byl zvolen tvářecí stroj PressLine 1800T. Výsledek simulace tím nebude ovlivněn, protože ostatní parametry byla nastaveny souhlasně se zařízením BUP 600.



Obr. 55. Výrobní plán

10.1.6 Tažník a přidržovač

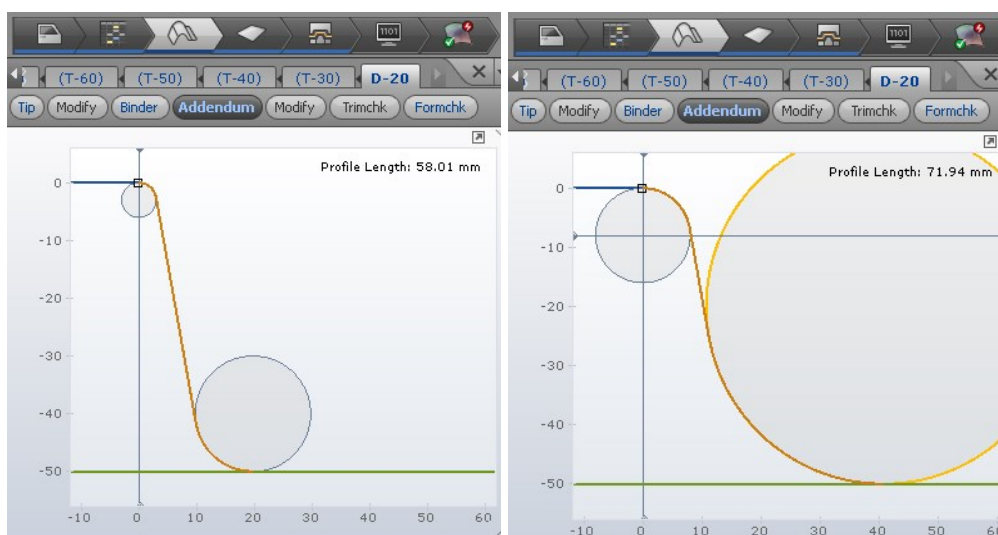
Vzhledem k tomu, že se jednalo o simulaci jednoduchého dílu, nebylo potřeba přidržovač nijak upravovat a byl zhotoven automaticky. Díl neobsahoval žádné díry ani žádné ostré přechody, takže nebylo potřeba ani tažník nijak upravovat a byl zhotoven také automaticky.



Obr. 56. Tažník

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

Jediné, co bylo potřeba nastavit byla geometrie tažníku. Ta se nastavila pomocí poloměrů. Pro metodu podle Erichsena byla horní kružnice nastavena na poloměr $R = 3$ mm a spodní kružnice na poloměr $R = 9$ mm, protože k tažení byl použit tažník o průměru 18 mm. Pro metodu Nakajima byla horní kružnice nastavena na poloměr $R = 8$ mm a spodní kružnice na poloměr $R = 30$ mm, protože k tažení byl použit tažník o průměru 60 mm.

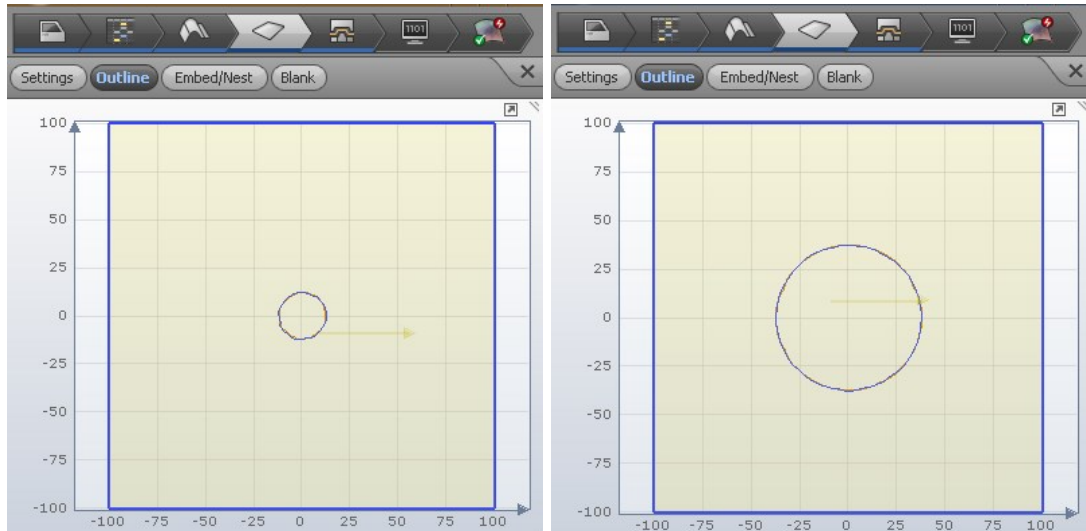


Obr. 57. Nastavení geometrie tažníku

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

10.1.7 Přístřih plechu

Přístřihu plechu se zvolil čtvercového tvaru o délce strany 200 mm.



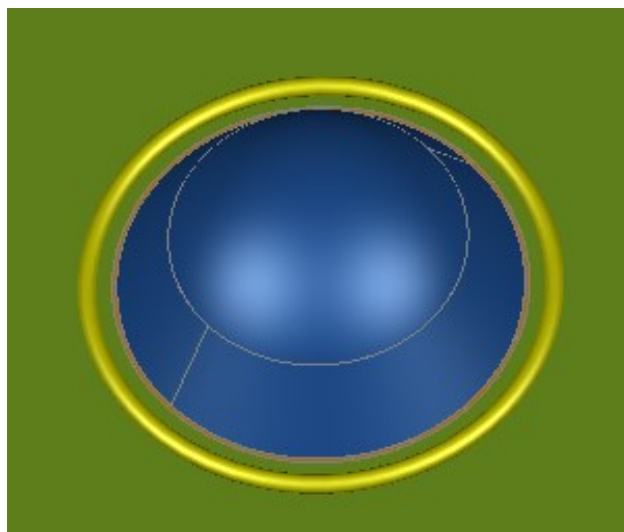
Obr. 58. Přístřih plechu

Vlevo metoda podle Erichsena, vpravo metoda Nakajima

10.1.8 Brzdící drážka

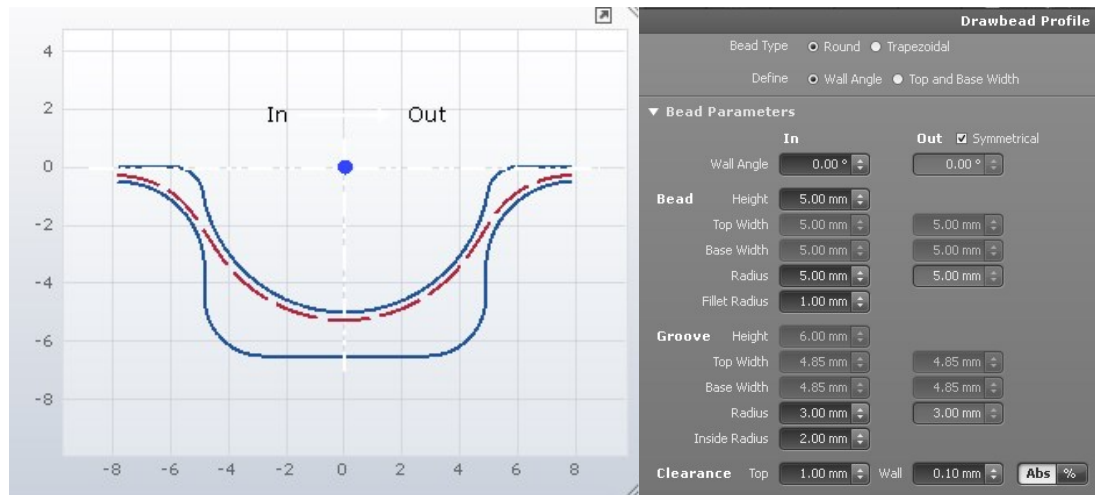
V případě metody podle Erichsena nebyla brzdící drážka definována, protože reálný tah byl proveden bez brzdící drážky. Na rozdíl od metody podle Erichsena metoda Nakajima brzdí drážku využívá. Z toho důvodu byla definována i v simulaci.

U složitějších dílů umožňuje software Autoform R8 využít brzdící strategie. Pomocí brzdící strategie lze brzdící drážku rozdělit na části a každé této části definovat rozměry. V tomto případě se jednalo o jednoduchý výtah, který nevyžadovalo použití brzděné strategie.



Obr. 59. Brzdící drážka

Profil brzdné drážky byl zvolen kruhový (Round). Výška brzdné drážky byla nadefinována na hodnotu 5 mm a rádius drážky na hodnotu 5 mm. Tyto rozměry byly převzaty z reálných tahů.



Obr. 60. Profil a rozměry brzdící drážky

10.2 Výsledky simulací

V této části budou prezentovány jednotlivé výsledky simulace pro každou tloušťku plechu a pro každý materiál. Výše zmíněný postup nastavení simulace byl popsán pouze pro jeden případ, protože nastavení jednotlivých simulací se liší pouze v importovaném dílu a nastavení materiálu a tloušťky plechu.


Software Autoform R8 umožňuje vyhodnocení mnoha parametrů. Mezi ty nejdůležitější parametry patří:

- Tvářitelnost (FLD)
- Porušení (Max failure)
- Ztenčení (Thinning)

10.2.1 Tvářitelnost (FLD)

K vyhodnocení procesu tváření slouží limitní diagram tvářitelnosti (FLD diagram), který ukazuje vhodnost lisovatelnosti plechu vzhledem k nastaveným procesním parametrům.

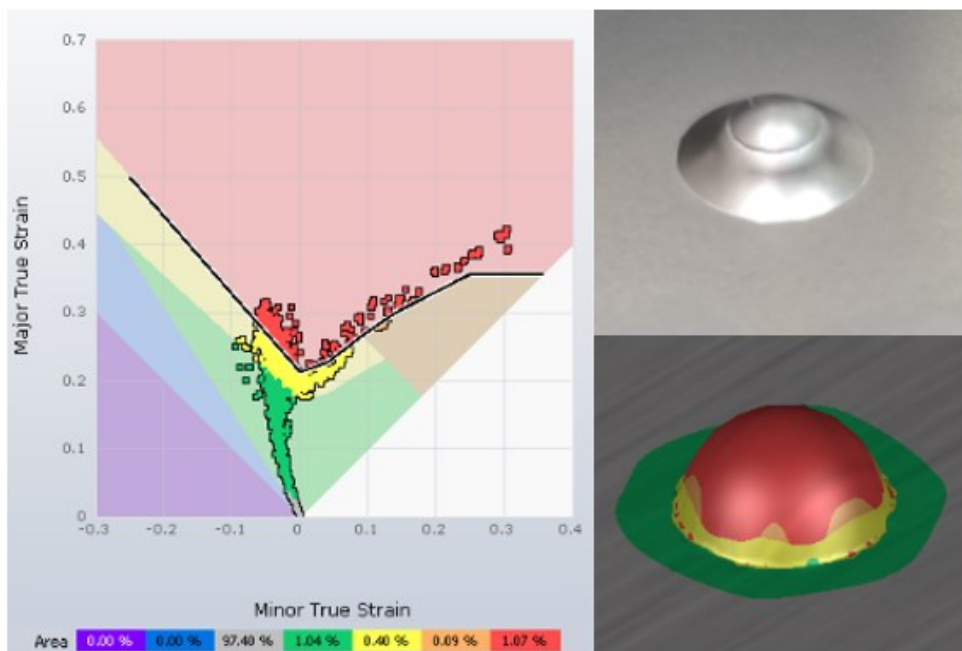
Cílem simulací bylo zjištění nebezpečných oblastí, v kterých by mělo v reálném procesu dojít k porušení materiálu. A porovnat tyto výsledky s reálným výtažky.

	<p>Thickening</p> <p>Compress</p> <p>Insuff Stretch</p> <p>Safe</p> <p>Risk of splits</p> <p>Excess thinning</p> <p>Splits</p>	<p>Ztenčení</p> <p>Stlačení</p> <p>Nevyužitý materiál</p> <p>Bezpečná oblast</p> <p>Oblast možného vzniku trhlin</p> <p>Nadměrné ztenčení</p> <p>Vznik trhlin</p>
---	--	---

Obr. 61. Popis oblastí FLD diagramu

Erichsen - 0,5 mm, DC03

První simulovaný plech byl o tloušťce 0,5 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 97,40 % materiálu nevyužito, 1,04 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,40 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,09 % v oblasti nadměrného ztenčení a 1,07 % v oblasti vzniku trhlin.

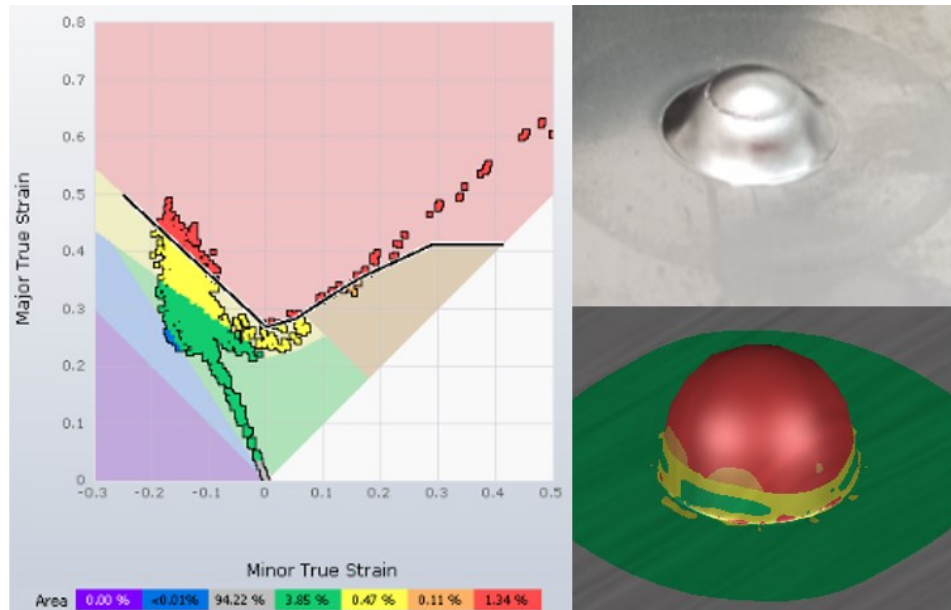


Obr. 62. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 0,5 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Erichsen - 1,0 mm, DC03

Další simulovaný plech byl o tloušťce 1,0 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 94,22 % materiálu nevyužito, 3,85 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,47 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,11 % v oblasti nadměrného ztenčení a 1,34 % v oblasti vzniku trhlin.

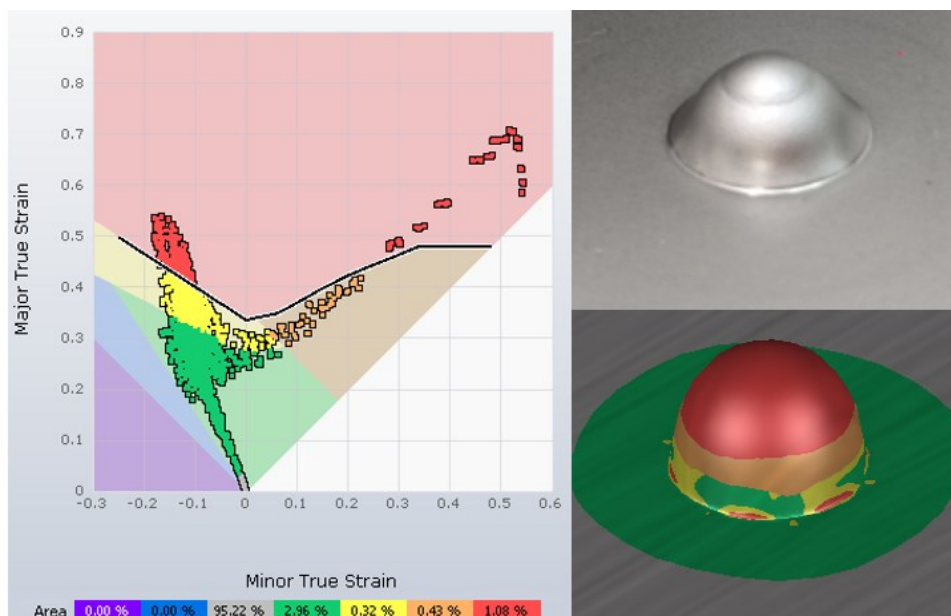


Obr. 63. FLD diagram Erichsen – 1,0 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Erichsen - 1,5 mm, DC03

Další simulovaný plech byl o tloušťce 1,5 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 95,22 % materiálu nevyužito, 2,96 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,32 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,43 % v oblasti nadměrného ztenčení a 1,08 % v oblasti vzniku trhlin.

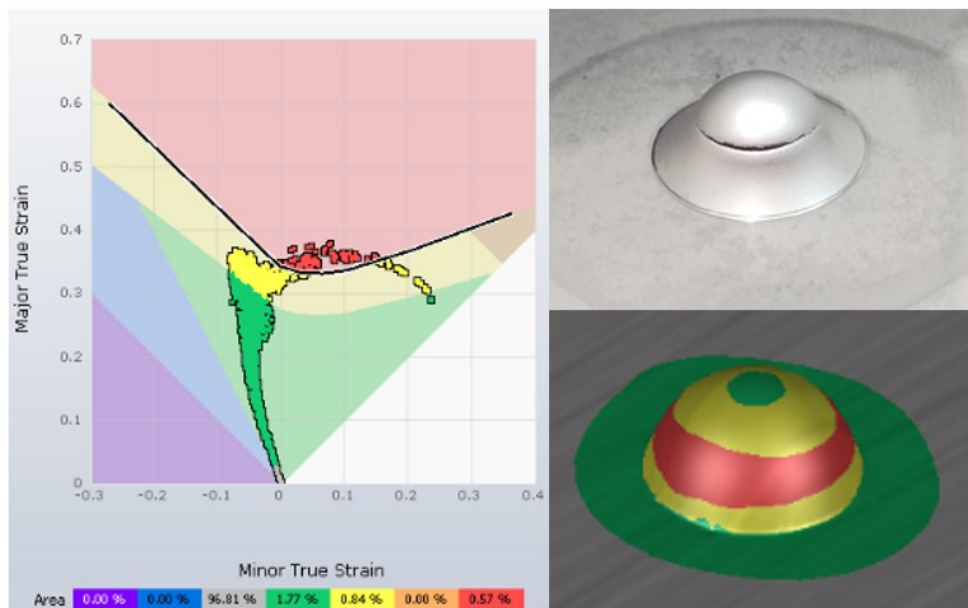


Obr. 64. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,5 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Erichsen - 0,5 mm, EN 1.4306

Simulovaný plech byl o tloušťce 0,5 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 96,81 % materiálu nevyužito, 1,77 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,84 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0 % v oblasti nadměrného ztenčení a 0,57 % v oblasti vzniku trhlin.

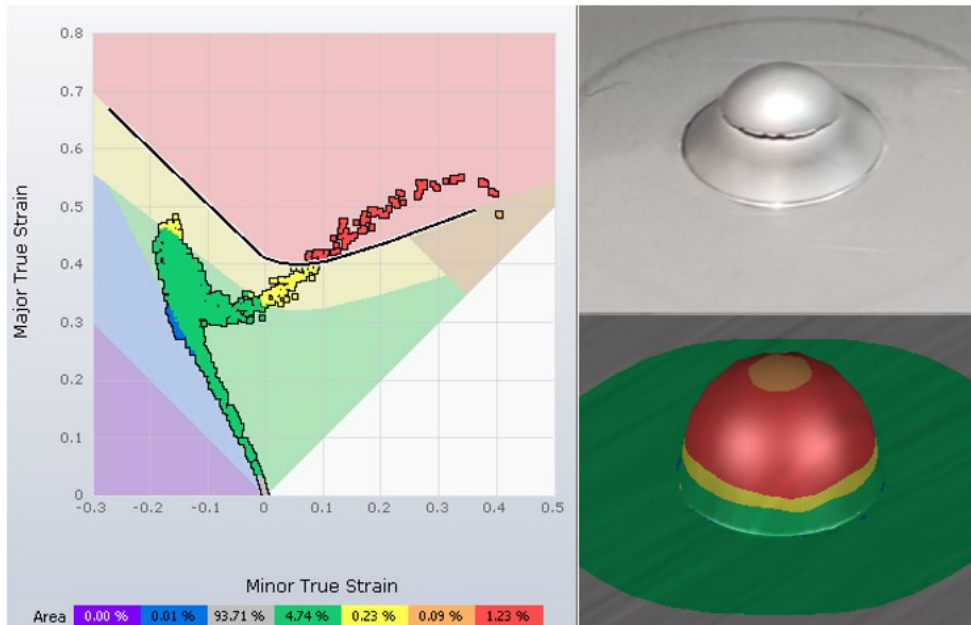


Obr. 65. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 0,5 mm, EN 1.4306

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Erichsen – 1,0 mm, EN 1.4306

Simulovaný plech byl o tloušťce 1,0 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 93,71 % materiálu nevyužito, 4,74 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,23 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,09 % v oblasti nadměrného ztenčení a 1,23 % v oblasti vzniku trhlin.

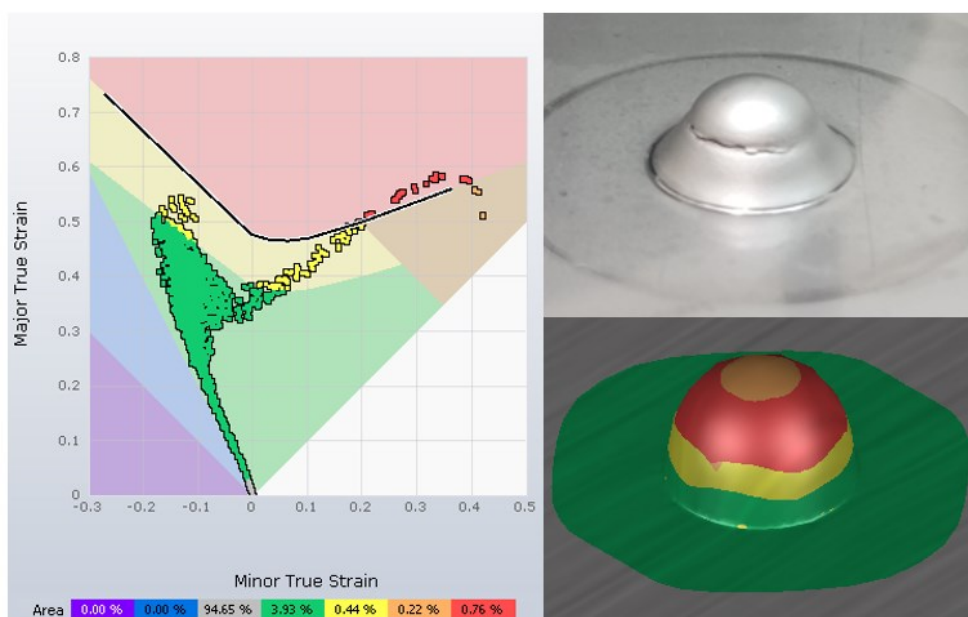


Obr. 66. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,0 mm, EN 1.4306

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Erichsen – 1,5 mm, EN 1.4306

Simulovaný plech byl o tloušťce 1,5 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 94,65 % materiálu nevyužito, 3,93 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,44 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,22 % v oblasti nadměrného ztenčení a 0,76 % v oblasti vzniku trhlin.

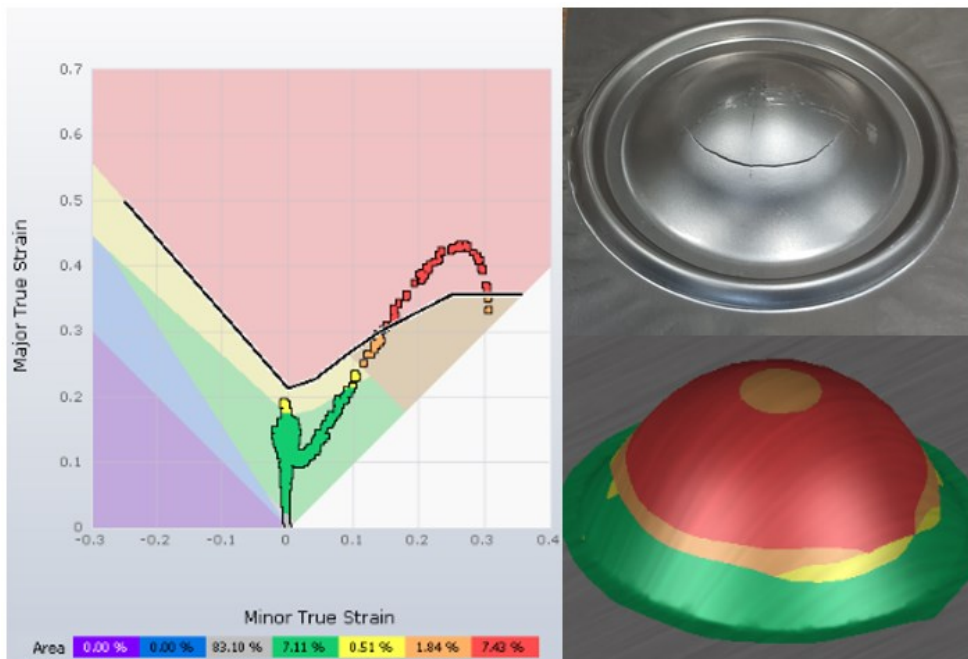


Obr. 67. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,5 mm, EN 1.4306

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima - 0,5 mm, DC03

Simulovaný plech byl o tloušťce 0,5 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 83,10 % materiálu nevyužito, 7,11 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,51 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 1,84 % v oblasti nadměrného ztenčení a 7,43 % v oblasti vzniku trhlin.

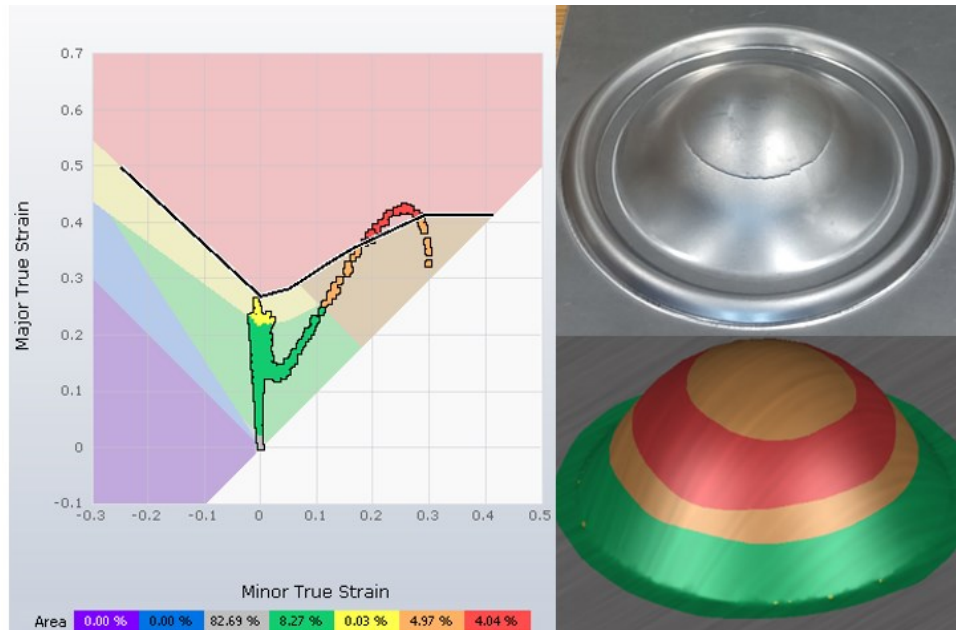


Obr. 68. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 0,5 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima - 1,0 mm, DC03

Simulovaný plech byl o tloušťce 1,0 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 82,69 % materiálu nevyužito, 8,27 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,03 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 4,97 % v oblasti nadměrného ztenčení a 4,04 % v oblasti vzniku trhlin.

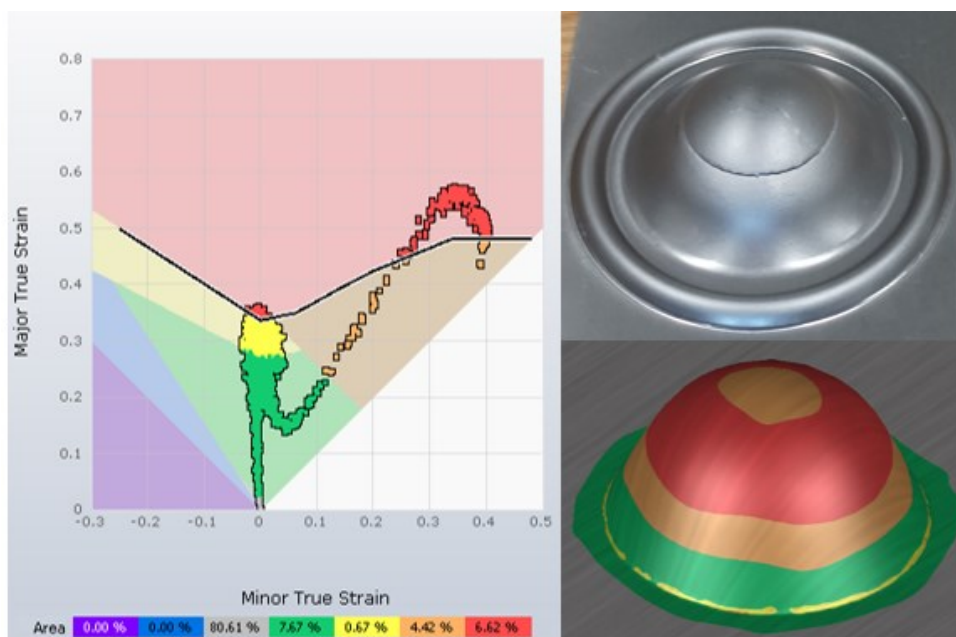


Obr. 69. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,0 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima - 1,5 mm, DC03

Simulovaný plech byl o tloušťce 1,5 mm z materiálu DC03. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 80,61 % materiálu nevyužito, 7,67 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,67 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 4,42 % v oblasti nadměrného ztenčení a 6,62 % v oblasti vzniku trhlin.

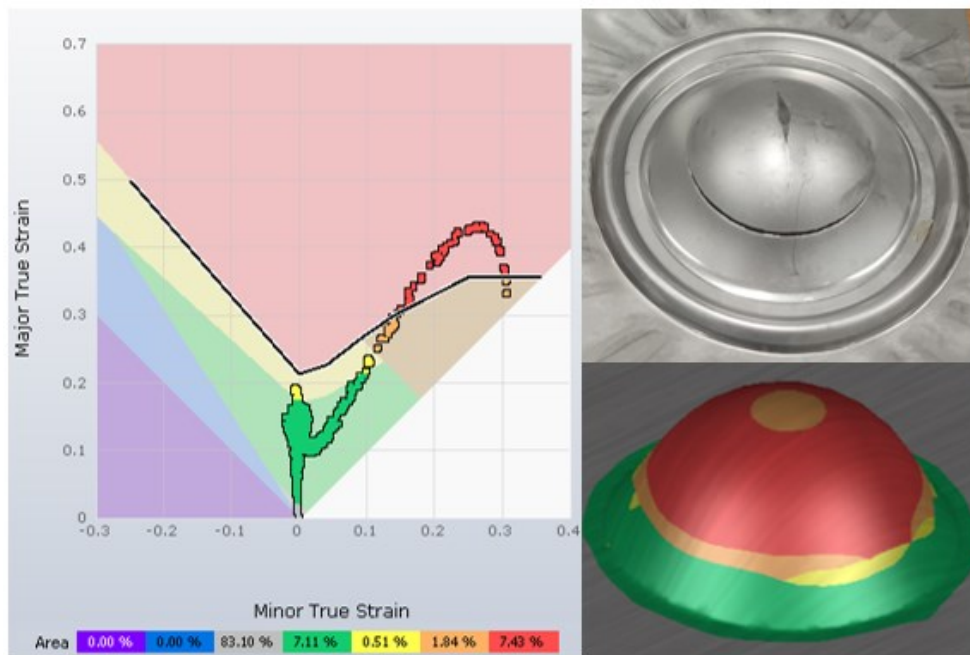


Obr. 70. FLD diagrama porovnání simulace a reality Nakajima – 1,5 mm, DC03

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima - 0,5 mm, EN 1.4306

Simulovaný plech byl o tloušťce 0,5 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 83,10 % materiálu nevyužito, 7,11 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 0,51 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 1,84 % v oblasti nadměrného ztenčení a 7,43 % v oblasti vzniku trhlin.

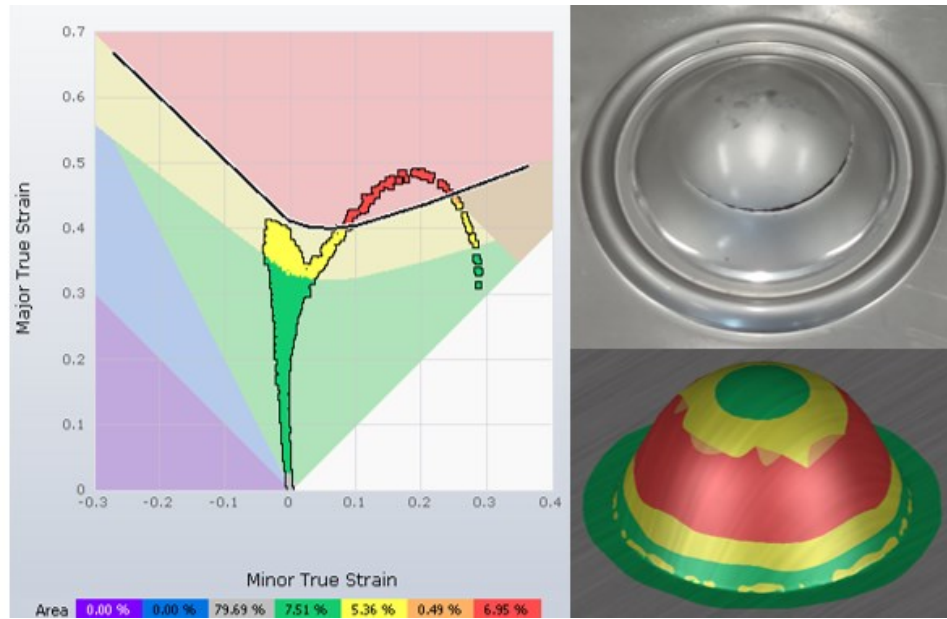


Obr. 71. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 0,5 mm, EN 1.4306

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima – 1,0 mm, EN 1.4306

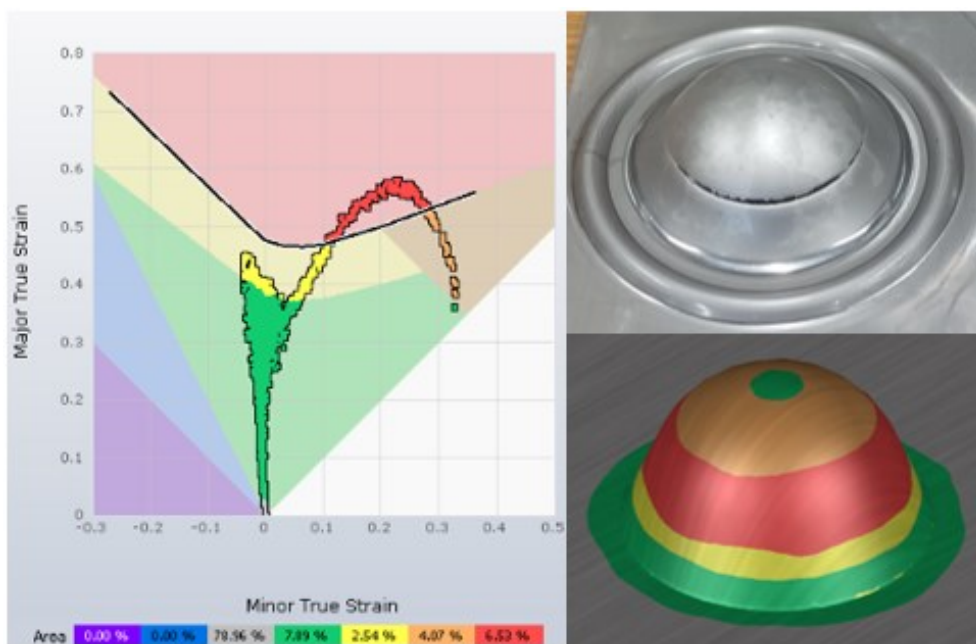
Simulovaný plech byl o tloušťce 1,0 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 79,69 % materiálu nevyužito, 7,51 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 5,36 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 0,49 % v oblasti nadměrného ztenčení a 6,95 % v oblasti vzniku trhlin.



Obr. 72. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,0 mm, EN 1.4306
V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

Nakajima – 1,5 mm, EN 1.4306

Simulovaný plech byl o tloušťce 1,5 mm z materiálu EN 1.4306. Z FLD diagramu je vidět, že z důvodu velkého přístřihu plechu je 78,96 % materiálu nevyužito, 7,89 % plechu se nachází v bezpečné oblasti, 2,54 % v oblasti nebezpečí vzniku trhliny, 4,07 % v oblasti nadměrného ztenčení a 6,53 % v oblasti vzniku trhlin.

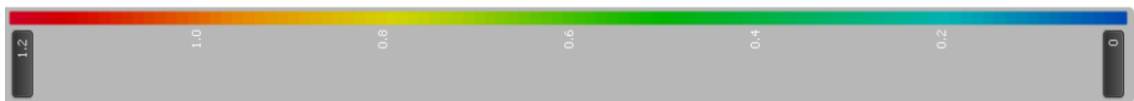


Obr. 73. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,5 mm, EN 1.4306

V reálném tahu došlo ke vzniku trhliny v horní části výtažku. Stejný výsledek zobrazuje i simulace.

10.2.2 Porušení (Max failure)

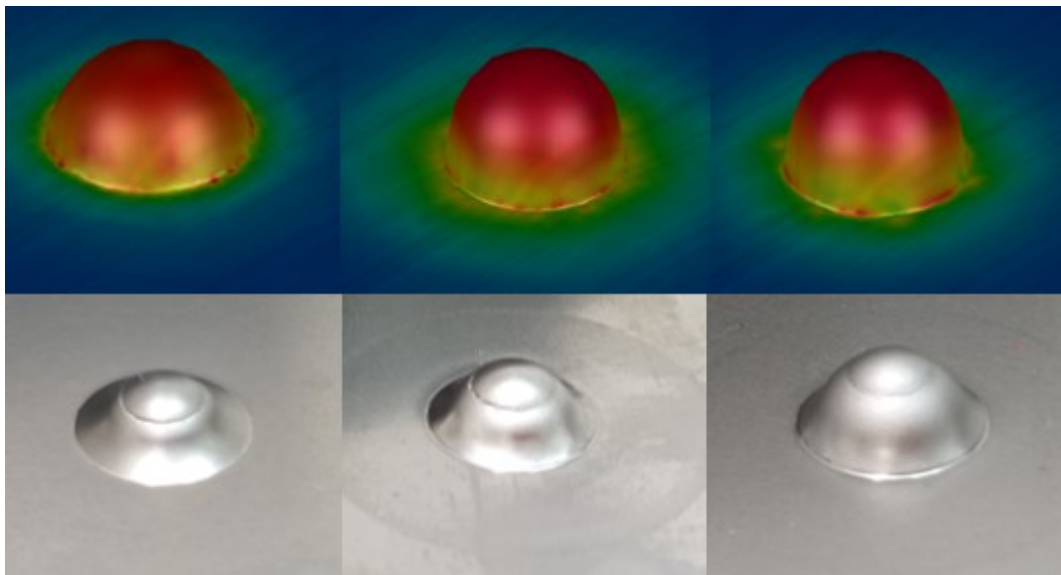
Výsledek porušení (Max failure) zobrazuje místa, která jsou nejnáchylnější na porušení. Hodnoty jsou udávány procentuálně 0 až 1 a jsou prezentovány barevnou škálou. V případě, kdy výsledek překročí hodnotu 1 jedná se o porušení celistvosti materiálu a dochází ke vzniku trhliny.



Obr. 74. Stupnice porušení (Max failure)

Erichsen – DC03

Výsledek simulace pro metodu podle Erichsena a materiál plechu DC03 zobrazuje, že kritická místa, kde dojde ke vzniku trhliny se nacházejí v horní části výtažku. V této části nabývá hodnota porušení (Max failure) maximálních hodnot. Tyto výsledky odpovídají reálným tahům.



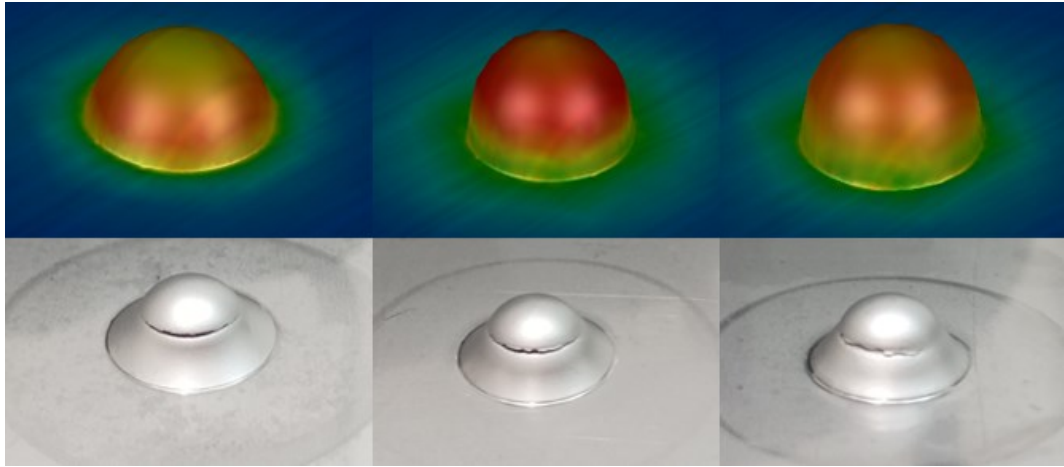
Obr. 75. Porušení (Max failure) pro metodu podle Erichsena a materiál DC03

Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

Erichsen – EN 1.4306

Výsledek simulace pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306 zobrazuje, že kritická místa, kde dojde ke vzniku trhliny se nacházejí v horní části výtažku. V této části nabývá

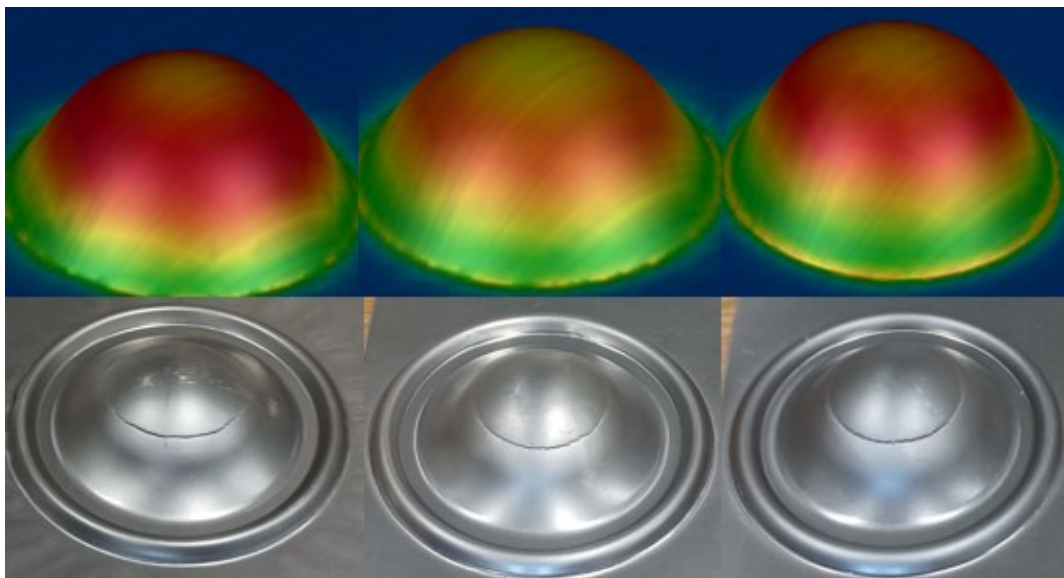
hodnota porušení (Max failure) maximálních hodnot. Tyto výsledky odpovídají reálným tahům.



*Obr. 76. Porušení (Max failure) pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306
Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm*

Nakajima – DC03

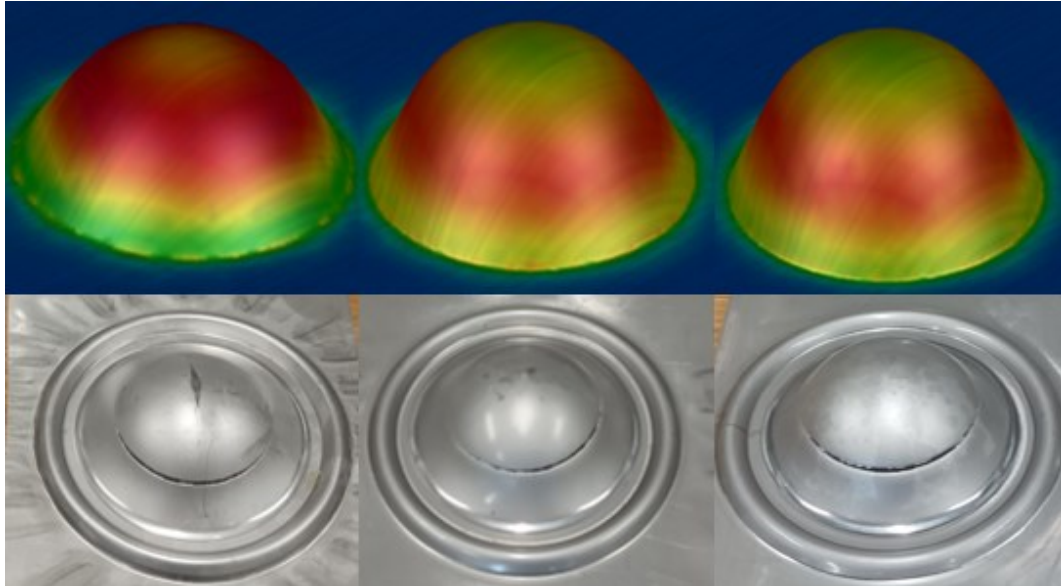
Výsledek simulace pro metodu Nakajima a materiál plechu DC03 zobrazuje, že kritická místa, kde dojde ke vzniku trhliny se nacházejí v horní části výtažku. V této části nabývá hodnota porušení (Max failure) maximálních hodnot. Tyto výsledky odpovídají reálným tahům.



*Obr. 77. Porušení (Max failure) pro metodu Nakajima a materiál DC03
Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm*

Nakajima – EN 1.4306

Výsledek simulace pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306 zobrazuje, že kritická místa, kde dojde ke vzniku trhliny se nacházejí v horní části výtažku. V této části nabývá hodnota porušení (Max failure) maximálních hodnot. Tyto výsledky odpovídají reálným tahům.

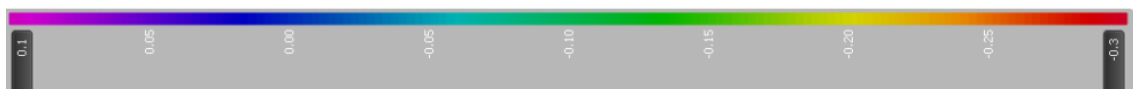


Obr. 78. Porušení (Max failure) pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306

Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

10.2.3 Ztenčení (Thinning)

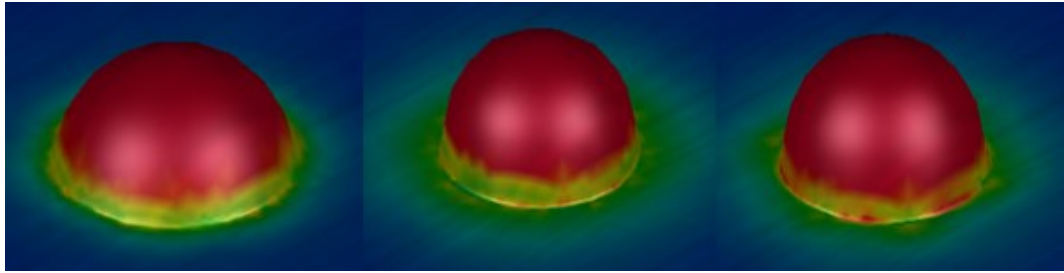
Výsledek ztenčení (Thinning) zobrazuje procentuální ztenčení plechu výtažku. Záporné hodnoty udávají ztenčení a kladné napěchování v daném místě. Hraniční hodnota je 25 %, ale už při 20 % se doporučuje povést optimalizaci procesu.



Obr. 79. Stupnice ztenčení (Thinning)

Erichsen – DC03

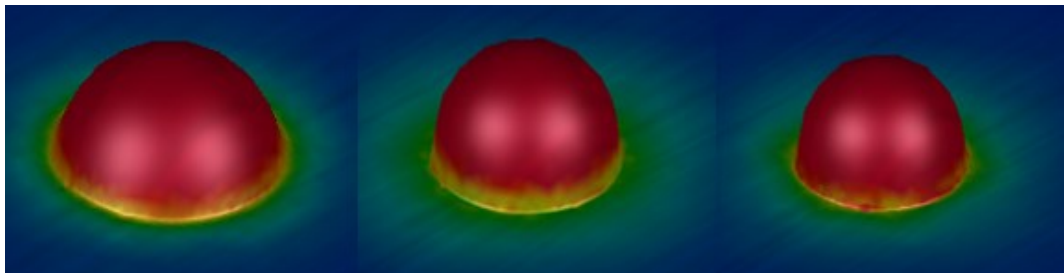
Výsledek simulace pro metodu podle Erichsena a materiál plechu DC03 zobrazuje, že k největšímu ztenčení dojde v horní části a na stěně výtažku. V této části nabývá hodnota ztenčení (Thinning) maximálních hodnot. V přechodové části (spodní rádius) výtažku a zbylého plechu hodnota ztenčení postupně klesá až na nulovou hodnotu.



Obr. 80. Ztenčení (Thinning) pro metodu podle Erichsena a materiál DC03
Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

Erichsen – EN 1.4306

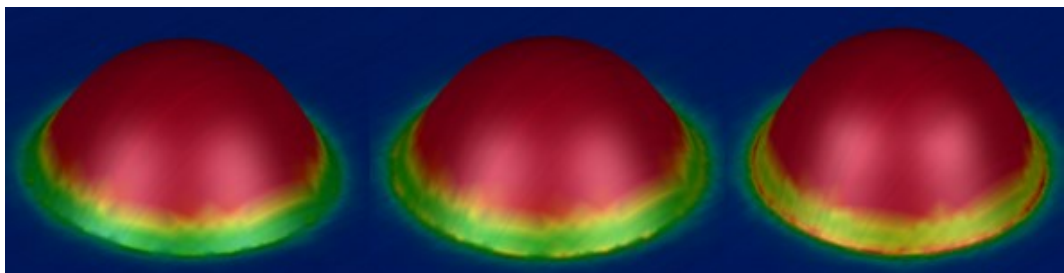
Výsledek simulace pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306 zobrazuje, že k největšímu ztenčení dojde v horní části a na stěně výtažku. V této části nabývá hodnota ztenčení (Thinning) maximálních hodnot. V přechodové části (spodní rádius) výtažku a zbylého plechu hodnota ztenčení postupně klesá až na nulovou hodnotu.



Obr. 81. Ztenčení (Thinning) pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306
Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

Nakajima – DC03

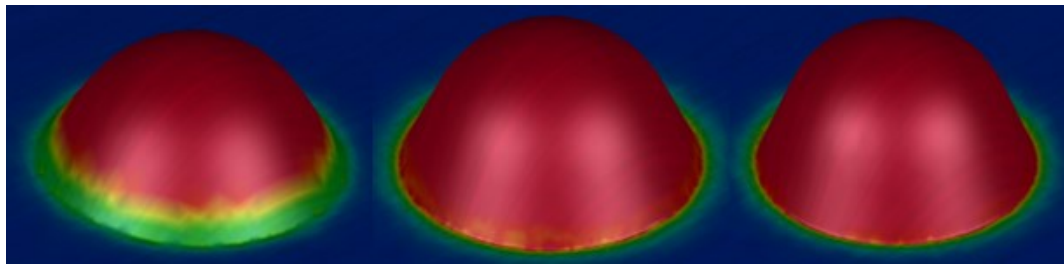
Výsledek simulace pro metodu Nakajima a materiál plechu DC03 zobrazuje, že k největšímu ztenčení dojde v horní části a na stěně výtažku. V této části nabývá hodnota ztenčení (Thinning) maximálních hodnot. V přechodové části (spodní rádius) výtažku a zbylého plechu hodnota ztenčení postupně klesá až na nulovou hodnotu.



Obr. 82. Ztenčení (Thinning) pro metodu Nakajima a materiál DC03
Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

Nakajima – EN 1.4306

Výsledek simulace pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306 zobrazuje, že k největšímu ztenčení dojde v horní části a na stěně výtažku. V této části nabývá hodnota ztenčení (Thinning) maximálních hodnot. V přechodové části (spodní rádius) výtažku a zbylého plechu hodnota ztenčení postupně klesá až na nulovou hodnotu.



Obr. 83. Ztenčení (Thinning) pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306

Zleva plech 0,5 mm, 1,0 mm, 1,5 mm

11 PŘÍPRAVA VZORKŮ

Z vytažených vzorků na zařízení BUP 600 bylo potřeba připravit vzorky, aby bylo možné měřit změnu mechanických vlastností v jednotlivých oblastech výtažku. Proces přípravy vzorků se skládá z nařezání jednotlivých výtažků, zalisování do pryskyřice a vybroušení vzorků.

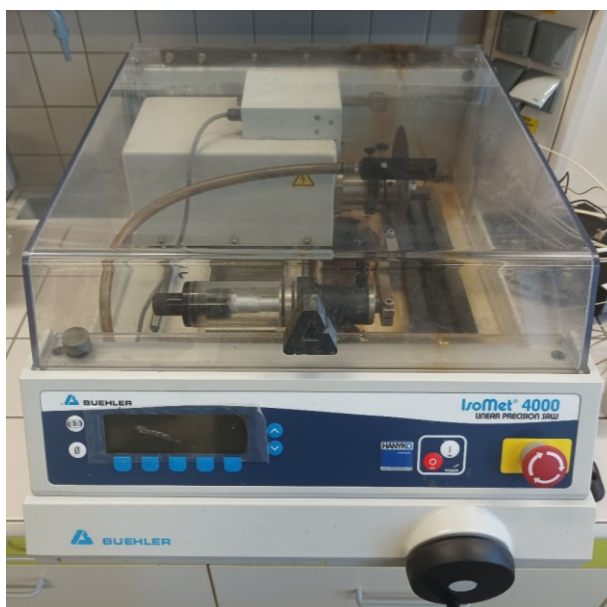
11.1 Řezání vzorků

Z vytažených vzorků byly vyřezány části tak, aby obsahovali jednotlivé oblasti výtažku, na kterých bylo možné měřit změny mechanických vlastností. Tyto řezy zobrazuje Obr. 84.



Obr. 84. Rozřezané výtažky

K nařezání vzorků byla použita přesná pila IsoMet 4000 od firmy Buehler. Pila využívá chlazení, které je přiváděno přímo do místa řezu. Toto chlazení bylo velmi důležité, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění vzorků.



Obr. 85. Pila IsoMet 4000

11.2 Zalisování vzorků

Nářezané vzorky bylo dále potřeba zalisovat z důvodu upnutí při měření mechanických vlastností. Vzorky byly zalisovány do práškové pryskyřice PhenoCure od firmy Buehler.

K zalisování se využil lis SimpliMet 1000 od Buehler. Na zařízení se nastavili základní parametry jako čas ohřevu (1:30 min), čas chlazení (4 min) a lisovací tlak (290 barů).



Obr. 86. Lis SimpliMet 1000 a pryskyřice PhenoCure

11.3 Broušení vzorků

Po zalisování bylo potřeba provést broušení vzorků. K tomu se využila leštička vzorků AutoMet 250 od firmy Buehler. Zalisované vzorky jsou upnuty v rotující hlavě a přitlačovány na brusný kotouč, který vykonává rovněž rotační pohyb.



Obr. 87. Leštička vzorků AutoMet 250

Nastavily se otáčky rotace hlavy na hodnotu 40 ot/min, otáčky brusného kotouče 100 ot/min a přítlačná síla na hodnotu 20 N. První broušení bylo provedeno na brusném papíru o zrnitosti P180. K dalšímu se využil brusný papír o zrnitosti P360, poté brusný papír o zrnitosti P600, a nakonec brusný papír o zrnitosti P1200.



Obr. 88. Vybroušené vzorky

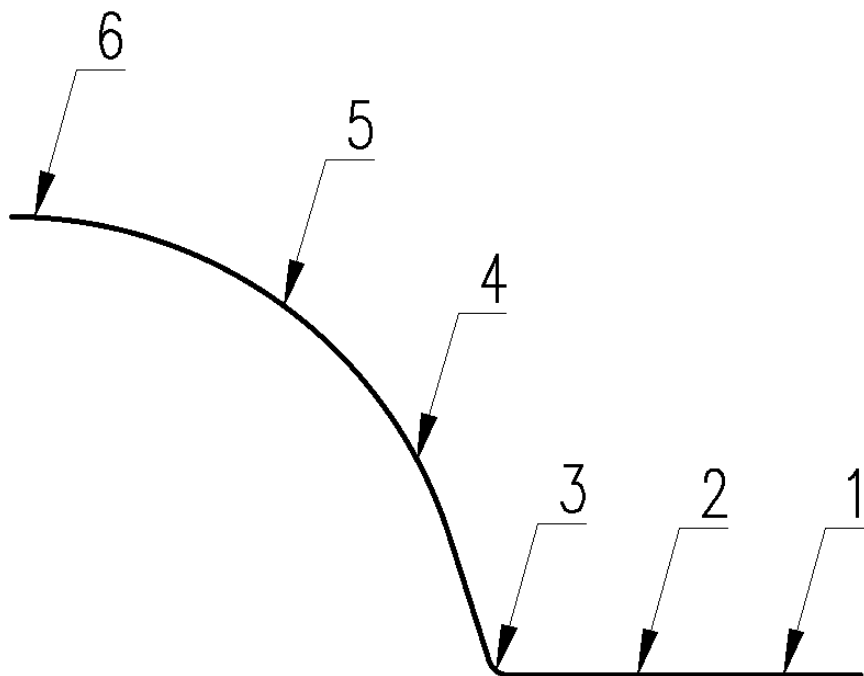
12 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Hlavním cílem diplomové práce bylo měření změny mechanických vlastností vlivem procesu hlubokého tažení. Mechanické vlastnosti budou ovlivněny metodou tažení, materiálem a tloušťkou plechu. Měření probíhalo na výše zmíněných vzorcích.

12.1 Měření oblastí pro metodu podle Erichsena

U vzorků tažených metodou podle Erichsena bylo zvoleno 6 oblastí, kde se měřily mechanické vlastnosti.

1. Oblast neovlivněná hlubokým tažením
2. Oblast mírně ovlivněná hlubokým tažením
3. Oblast počátku hlubokého tahu (spodní rádius)
4. Oblast spodního průběhu hlubokého tahu
5. Oblast horního průběhu hlubokého tahu
6. Oblast vrcholu hlubokého tahu

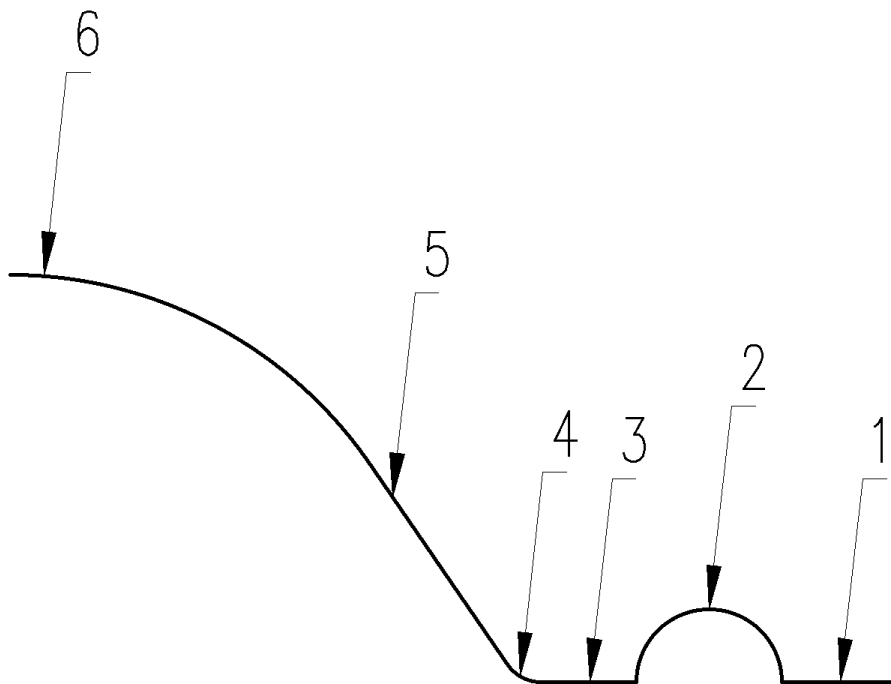


Obr. 89. Měřicí oblasti pro metodu podle Erichsena

12.2 Měřené oblasti pro metodu Nakajima

U vzorků tažených metodou Nakajima bylo zvoleno 6 oblastí, kde se měřily mechanické vlastnosti.

1. Oblast před brzdící drážkou
2. Oblast brzdící drážky
3. Oblast za brzdící drážkou
4. Oblast počátku hlubokého tahu (spodní rádius)
5. Oblast průběhu hlubokého tahu
6. Oblast vrcholu hlubokého tahu



Obr. 90. Měřící oblasti pro metodu Nakajima

12.3 Micko-Combi Tester

Měření mechanických vlastností proběhlo na zařízení Micro-Combi Tester od firmy CSM. Toto zařízení je určeno pro stanovení tvrdosti, modulu pružnosti, plastické a elastické práce, koeficientu tření. Zařízení je z důvodu zaznamenání a vyhodnocení dat připojeno k počítači a pro najíždění do prostoru měření vybaveno mikroskopem.



Obr. 91. Micro-Combi Tester

Postup měření spočíval v upnutí testovaného vzorku do zařízení, následným najetím do oblasti měření pomocí mikroskopu a posuvu stolu v ose X a Y a nastavením základních parametrů měření. Mezi základní parametry patří zatěžující síla, která byla nastavena na hodnotu 1 N a výdrž zátěže se nastavila na 12 sekund. Dále se nastavily parametry měřicí matice.

12.4 Výsledky měření

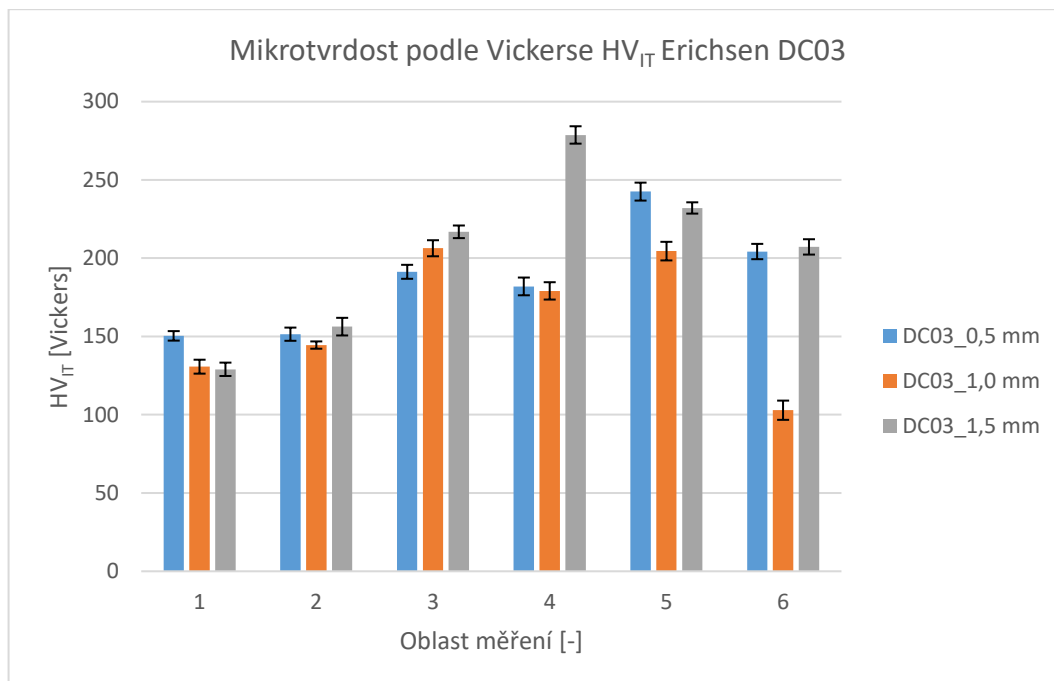
Výsledné hodnoty měření byly rozděleny podle metody tažení a podle materiálu. Z důvodu snadné interpretace výsledků budou prezentovány v grafické podobě. Mezi vyhodnocené výsledky patří mikrotvrдость podle Vickerse HV_{IT} , vtiskový modul E_{IT} , elastická práce W_{ELAST} a plastická práce W_{PLAST} .

12.4.1 Mikrotvrдость podle Vickerse HV_{IT}

Výsledek mikrotvrdsti podle Vickerse zobrazuje tvrdost neboli odpor proti vnikání cizího tělesa. Během procesu tažení dochází ke zpevnění materiálu, a to způsobuje změnu tvrdosti. Měřící oblasti 1 dosahují minimálních hodnot mikrotvrdsti, protože se jedná o část materiálu, která není ovlivněna hlubokým tažením, tudíž v této oblasti nedocházelo ke zpevnění. Naopak oblasti, které dosahují maximálních hodnot zobrazují oblasti, kde došlo ke vzniku trhlin.

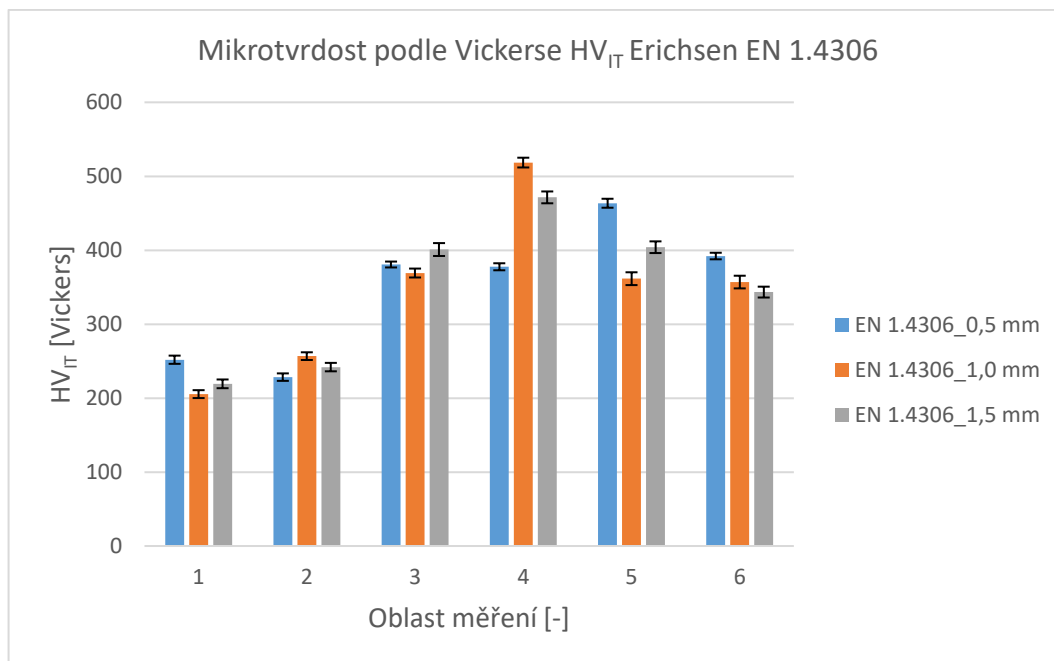
Erichsen

U dílů z materiálu DC03 tažených metodou podle Erichsena, mikrotvrдость postupně roste v průběhu tahu. Plech tloušťky 1,5 mm nabývá maxima v oblasti měření 4 a plechy tloušťky 1,0 mm a 0,5 mm dosahují maximální hodnoty mikrotvrđosti v oblasti měření 5. Tyto oblasti odpovídají místům vzniku trhlin. Výsledky se shodují se simulacemi, které tyto oblasti také označily za kritické. Na vrcholku výtažku dochází k poklesu mikrotvrđosti.



Obr. 92. Graf mikrotvrđosti podle Vickerse Erichsen DC03

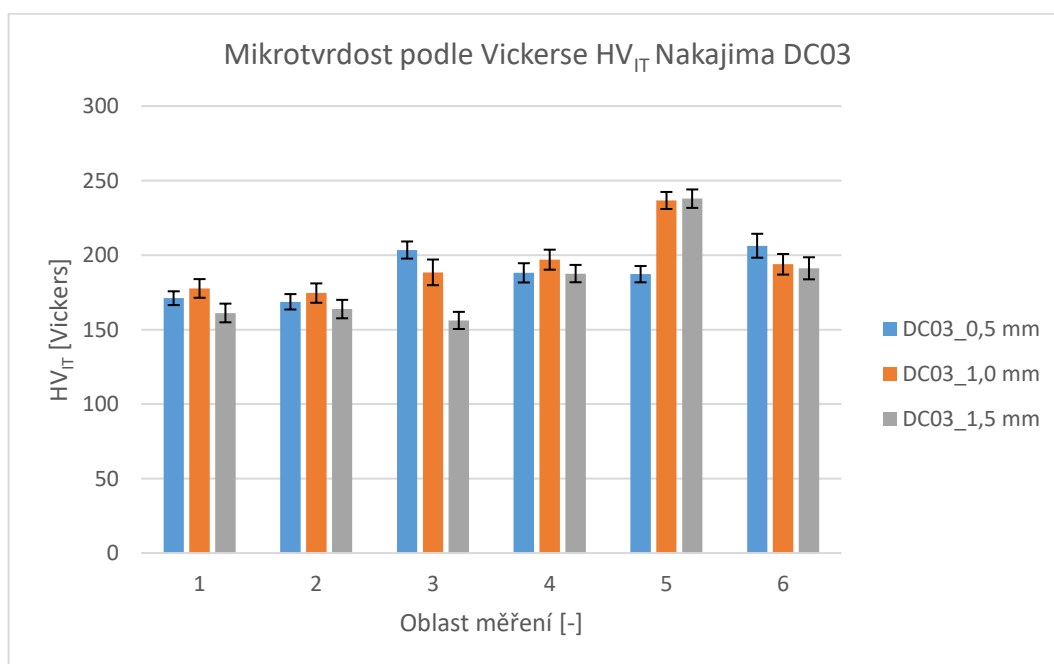
Materiál EN 1.4306 tažený metodou podle Erichsena vykazuje podobné chování jako materiál DC03. Rozdíl je v hodnotách mikrotvrđosti, kdy materiál EN 1.4306 dosahuje téměř dvojnásobných hodnot v porovnání s materiálem DC03 a v posuvu kritické oblasti dále od vrcholku výtažku. Tuto skutečnost opět potvrzují výsledky simulací, které shodně vykreslují kritické oblasti dále od vrcholku výtažku.



Obr. 93. Graf mikrotvrdości podle Vickerse Erichsen EN 1.4306

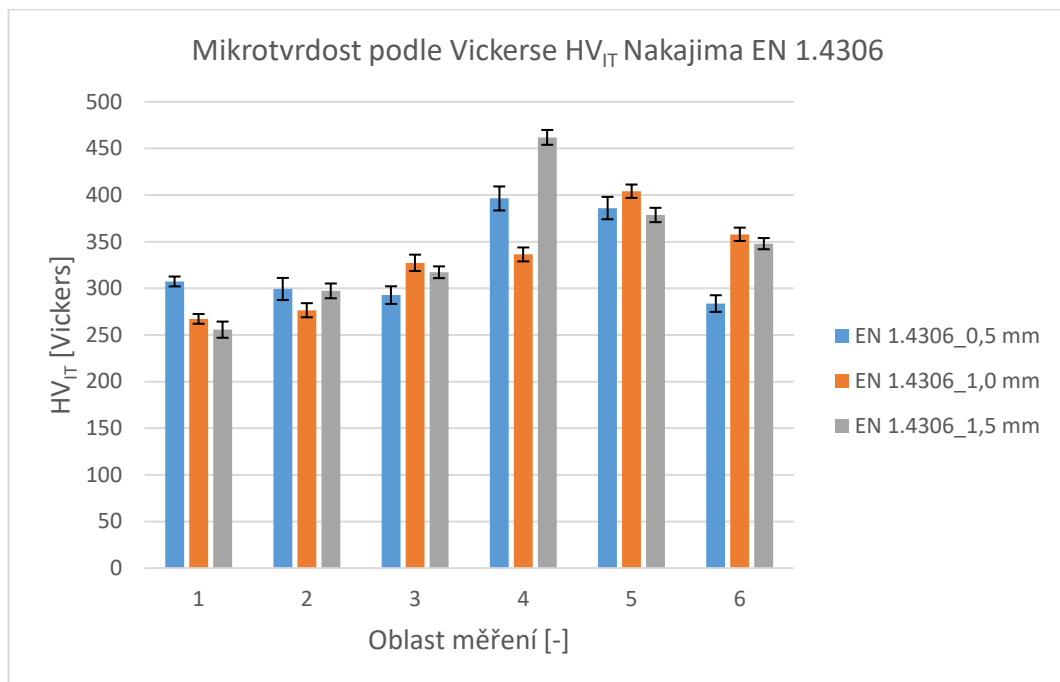
Nakajima

U metody Nakajima nastává nárůst mikrotvrdości za brzdící drážkou. V případě materiálu DC03 dosahuje maximálních hodnot v měřicích oblastech 5 a 6. Materiál EN 1.4306 dosahuje maxima v oblastech 4 a 5. Tyto výsledky odpovídají vytaženým vzorkům, kdy u materiálu DC03 vznikaly trhliny více na vrcholu kopule v porovnání s materiálem EN 1.4306. Tuto skutečnost opět potvrzují také výsledky simulací.



Obr. 94. Graf mikrotvrdości podle Vickerse Nakajima DC03

Stejně jako u metody podle Erichsen, tak i u metody Nakajima materiál EN 1.4306 dosahuje vyšších hodnot mikrotvrdosti v porovnání s materiálem DC03.



Obr. 95. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse Nakajima EN 1.4306

12.4.2 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

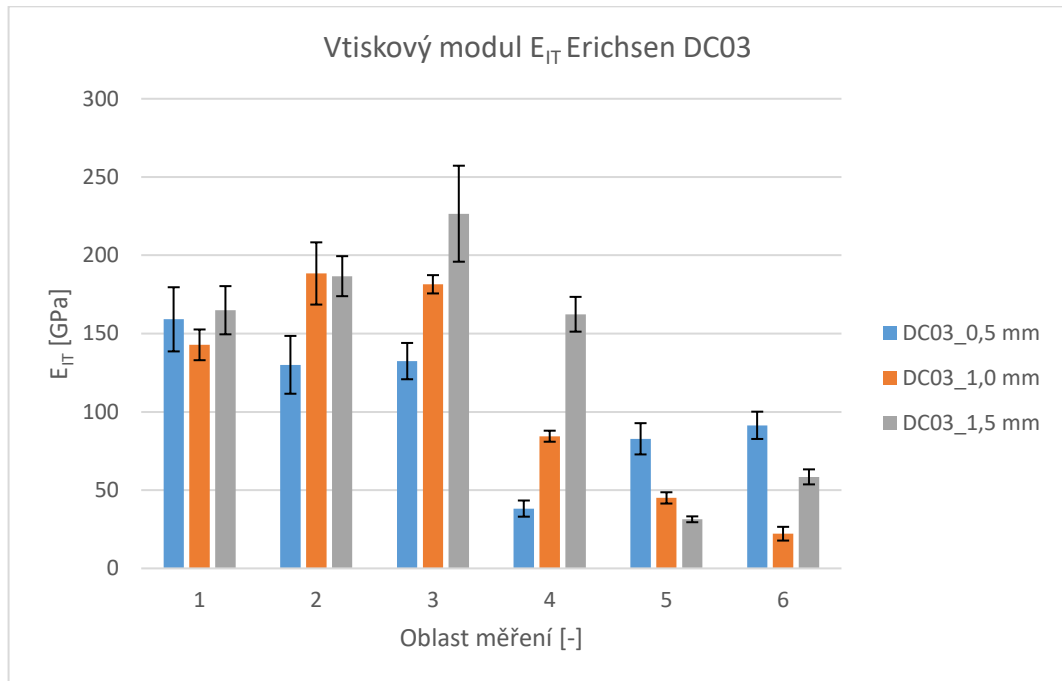
Modul pružnosti charakterizuje závislost napětí na deformaci. S rostoucím modulem pružnosti roste potřebné napětí pro dosažení stejné deformace.

Změna modulu pružnosti bude závislá na procesu tažení a na jeho deformaci výtažku v jednotlivých oblastech. S rostoucí deformací bude klesat modul pružnosti. Velikost deformace se na výsledném výtažku projeví například jako změna tloušťky stěny.

Erichsen

Materiál DC03 má v oblasti měření 1 téměř shodnou hodnotu modulu pružnosti pro všechny tloušťky. Výsledek simulace ztenčení pro tyto oblasti zobrazil nulové hodnoty, tudíž nedošlo ke změně tloušťky plechu, proto zůstaly zachované původní hodnoty modulu pružnosti materiálu. V průběhu tahu se však chová různě v závislosti na tloušťce. U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k postupnému poklesu modulu pružnosti až do oblasti 4, kde dosahuje svého minima, od této oblasti směrem k vrcholku kopule se poté zvyšuje. Vzorke tloušťky 1,0 mm a 1,5 mm zaznamenávají nárůst modulu pružnosti v oblastech měření 2 a 3, kde dosahují maximálních hodnot. Po dosažení maxima dochází k prudkému poklesu modulu pružnosti.

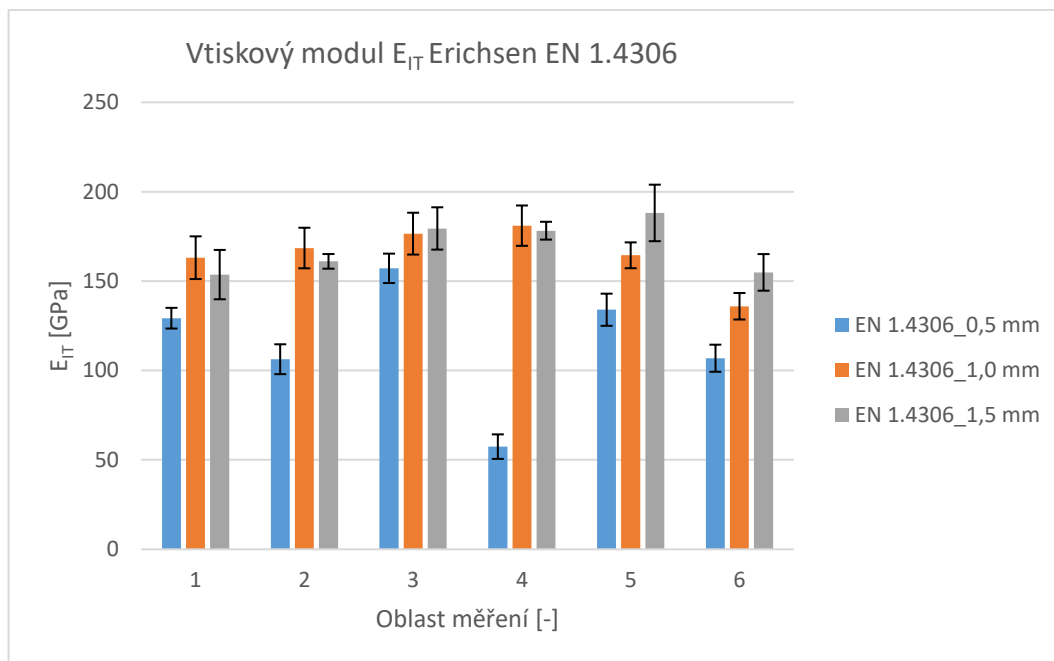
Tento pokles potvrzují také výsledky simulací, kdy od oblasti 4 dochází k maximálnímu ztenčení plechu.



Obr. 96. Graf vtiskového modulu pružnosti Erichsen DC03

Materiál EN 1.4306 v porovnání s materiálem DC03 vykazuje menší rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami modulu pružnosti.

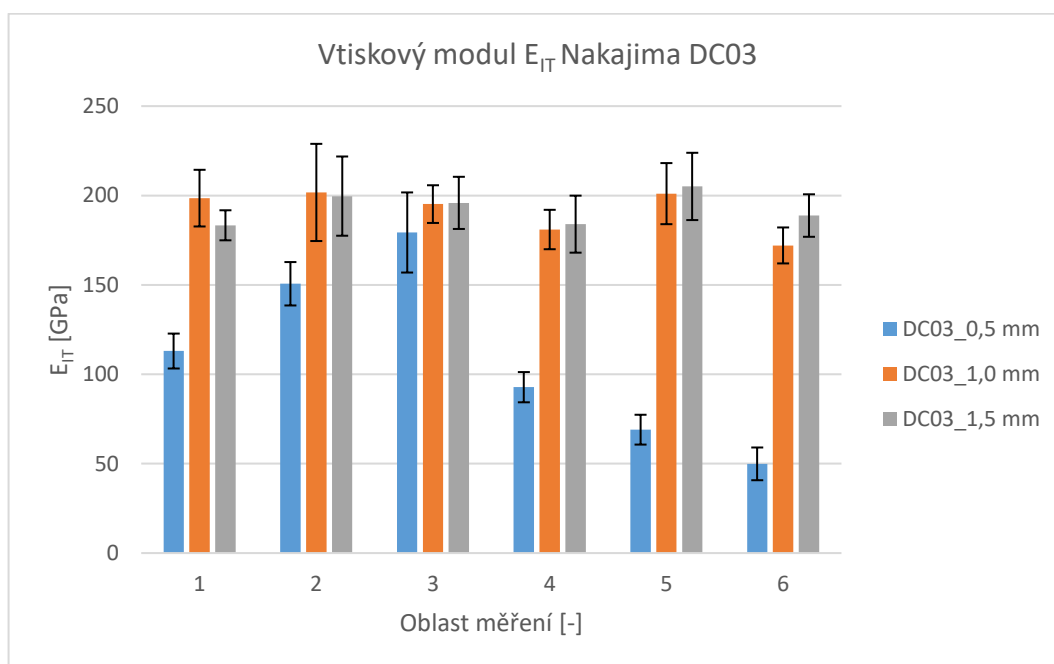
U plechu 0,5 mm byla minimální hodnota naměřena v oblasti 4 a stejně jako u materiálu DC03 byla zjištěna skoková změna modulu pružnosti mezi oblastmi 3 a 4. Tato skoková změna může vést ke vzniku trhliny. Zároveň i výsledek simulace porušení označuje toto místo za nerizikovější. V případě plechů 1,5 mm a 1,0 mm nejsou změny modulu tak výrazné, ale simulace stejně označuje oblast 4 za nejkritičtější.



Obr. 97. Graf vtiskového modulu pružnosti Erichsen EN 1.4306

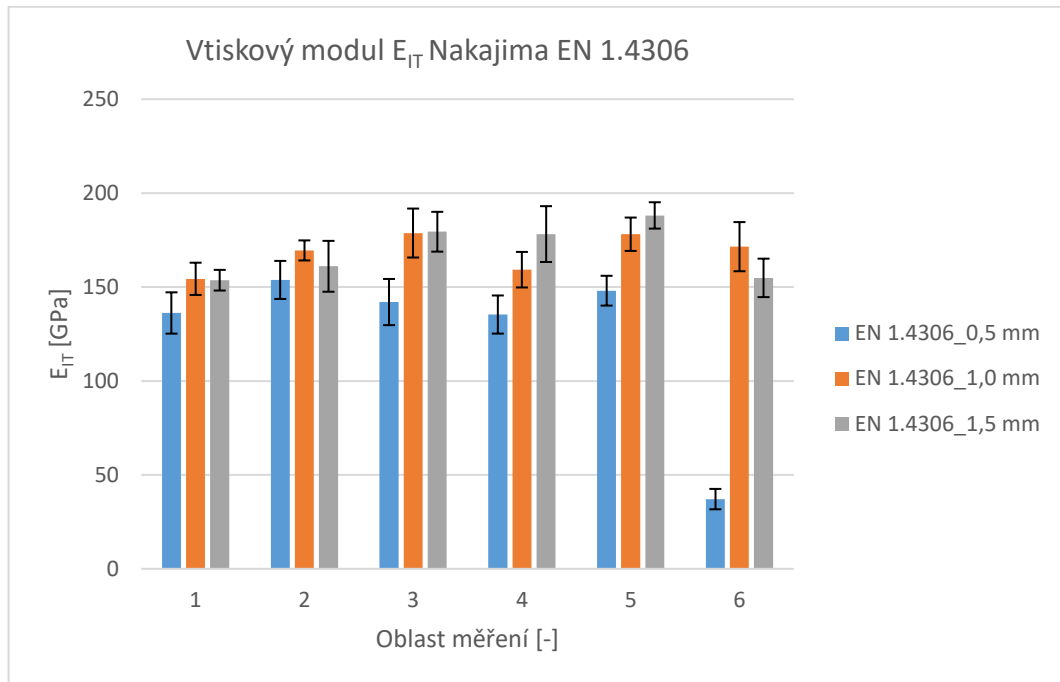
Nakajima

U plechu DC03 0,5 mm taženým metodou Nakajima došlo k nárůstu modulu pružnosti v oblasti brzdící drážky (oblast 2) a v oblasti za brzdící drážkou (oblast 3). Dále následoval pokles směrem k vrcholku kopule. U plechů 1,0 mm a 1,5 mm došlo k mírnému poklesu modulu v oblastech 4 a 6. Ostatní oblasti dosahují téměř shodných hodnot. Výsledky simulací označují oblasti 4 a 6 za nejrizikovější.



Obr. 98. Graf vtiskového modulu pružnosti Nakajima DC03

U plechu EN 1.4306 0,5 mm došlo k skokovému snížení modulu pružnosti v oblasti vrcholku kopule (oblast 6). U plechů 1,0 mm a 1,5 mm došlo k mírnému poklesu modulu v oblastech měření 4 a 6. Tyto výsledky se shodují se simulacemi, které u plechu 0,5 mm označily kritické místo výše na vrcholku kopule v porovnání s plechy 1,0 a 1,5 mm.



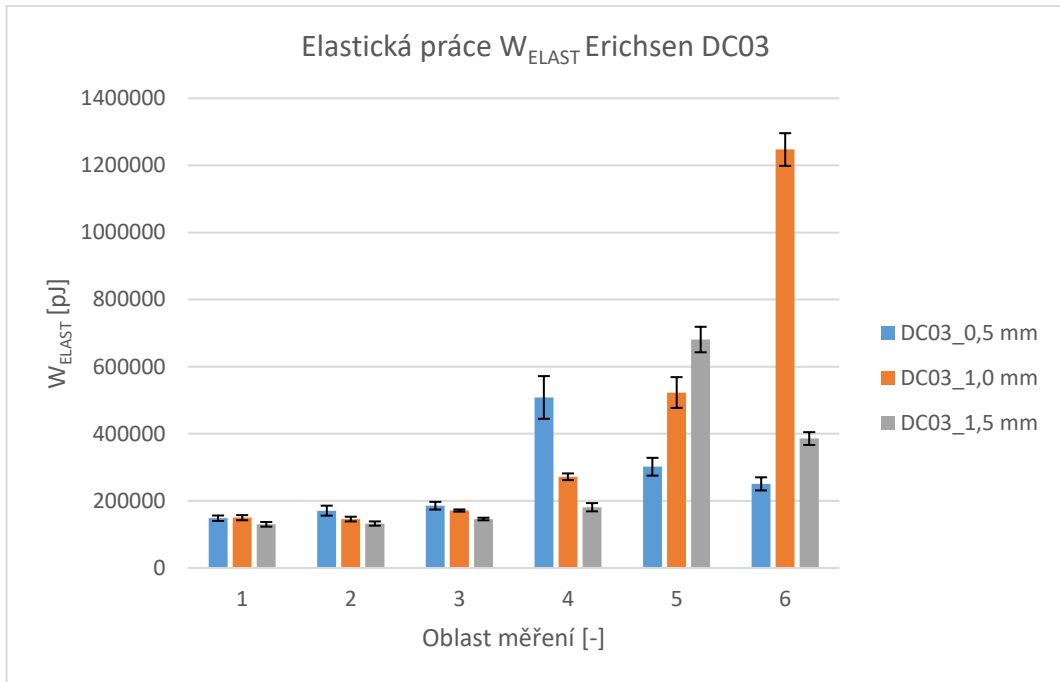
Obr. 99. Graf vtiskového modulu pružnosti Nakajima EN 1.4306

12.4.3 Elastická práce W_{ELAST}

Výsledek elastické práce reprezentuje elastickou část deformace, která po odlehčení zatížení zmizí na rozdíl od plastické deformace, která přetrvává v podobě stopě po vtisku zkušebního tělesa.

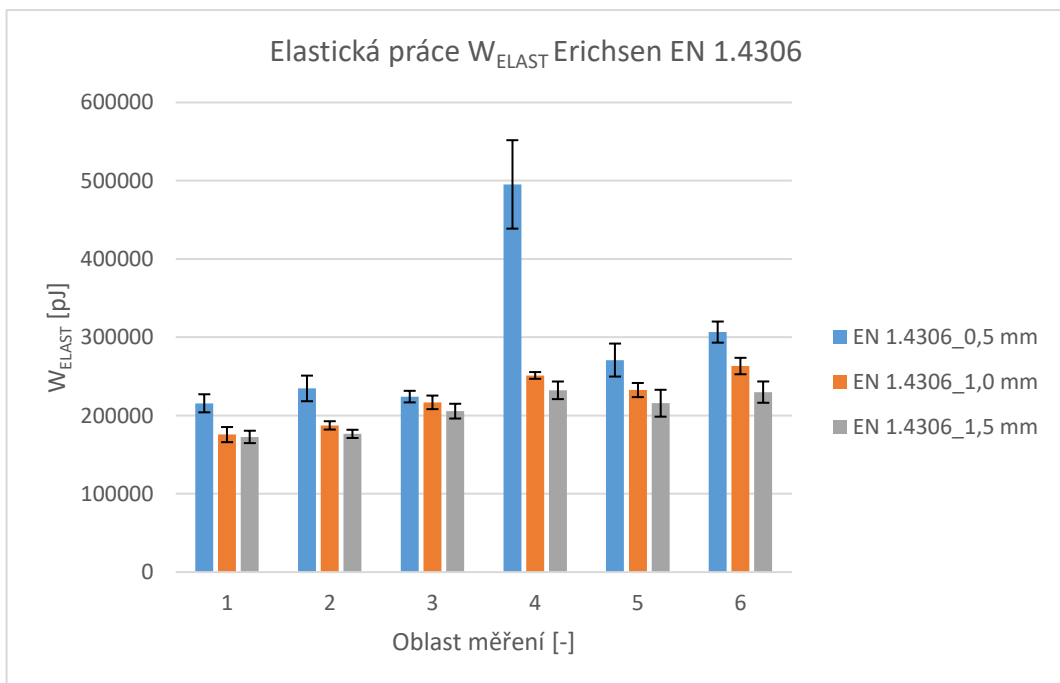
Erichsen

U materiálu DC03 taženým metodou podle Erichsena nastává k výrazným nárůstům elastické práce. V případě plechu tloušťky 0,5 mm v oblasti 4 a u plechu tloušťky 1,5 mm v oblasti 5. K největší změně došlo v oblasti měření 6 v případě plechu tloušťky 1,0 mm.



Obr. 100. Graf elastické práce Erichsen DC03

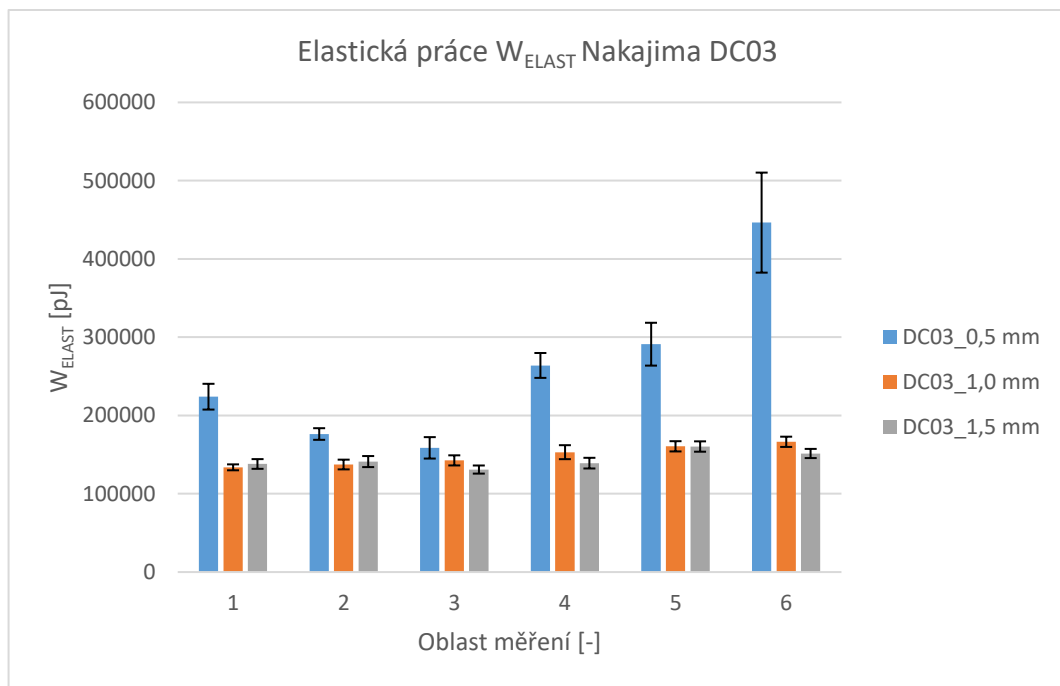
Stejně jako u vtiskového modulu pružnosti, nedošlo v případě materiálu EN 1.4306 k tak výrazným změnám elastické práce jako u materiálu DC03. Jediná výraznější změna nastala v oblasti měření 4 u plechu 0,5 mm, kdy se hodnota plastické práce zdvojnásobila.



Obr. 101. Graf elastické práce Erichsen EN 1.4306

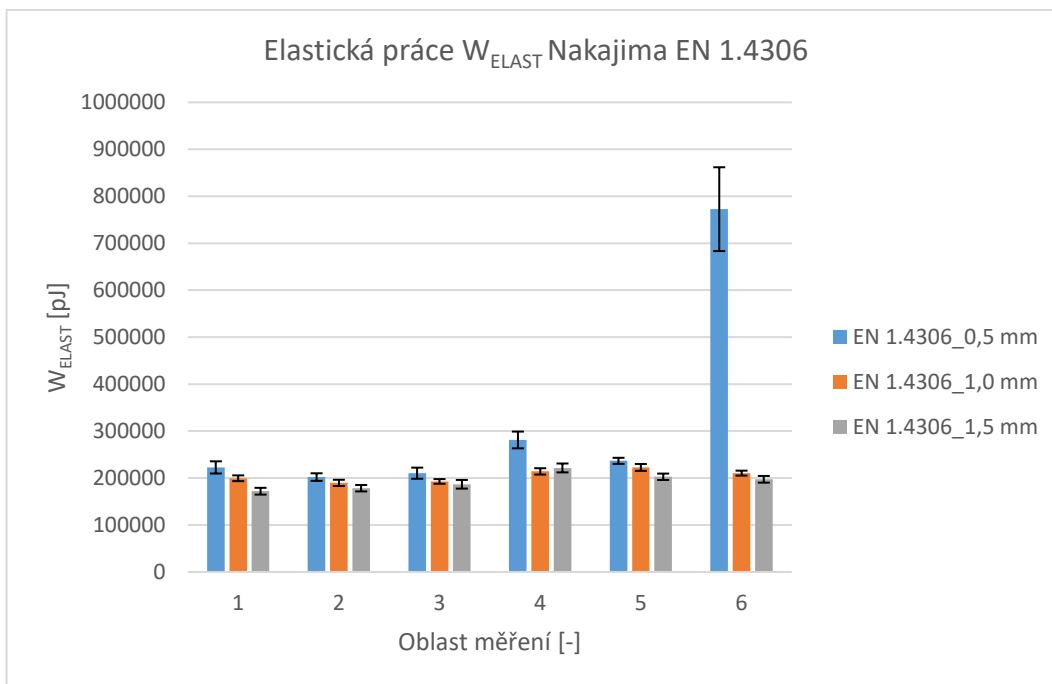
Nakajima

Plechý DC03 tloušťky 1,0 mm a 1,5 mm nezaznamenaly výrazné rozdíly v elastické práci mezi jednotlivými oblastmi měření. Oproti tomu u plechu tloušťky 0,5 mm došlo k postupnému snížení mezi oblastí 1 a 3. Po tomto snížení nastal nárůst na trojnásobnou hodnotu elastické práce.



Obr. 102. Graf elastické práce Nakajima DC03

Plechý z materiálu EN 1.4306 tažené metodou Nakajima zaznamenaly minimální rozdíly změny elastické práce mezi oblastmi měření. Jediný výrazný rozdíl nastal v oblasti měření 6 plechu 0,5 mm. V této oblasti nastal nárůst elastické energie.



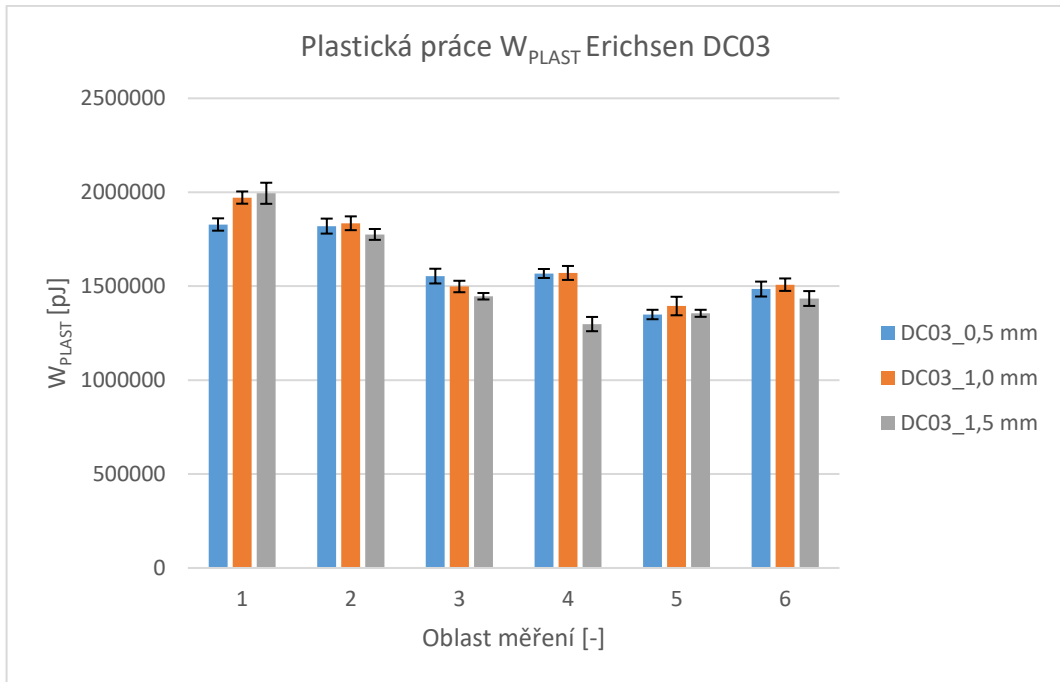
Obr. 103. Graf elastické práce Nakajima EN 1.4306

12.4.4 Plastická práce W_{PLAST}

Výsledek plastické práce reprezentuje plastickou část deformace, která po odlehčení zatížení přetrvává v podobě stopy po vtisku zkušebního tělesa na rozdíl od elastické deformace, která zmizí.

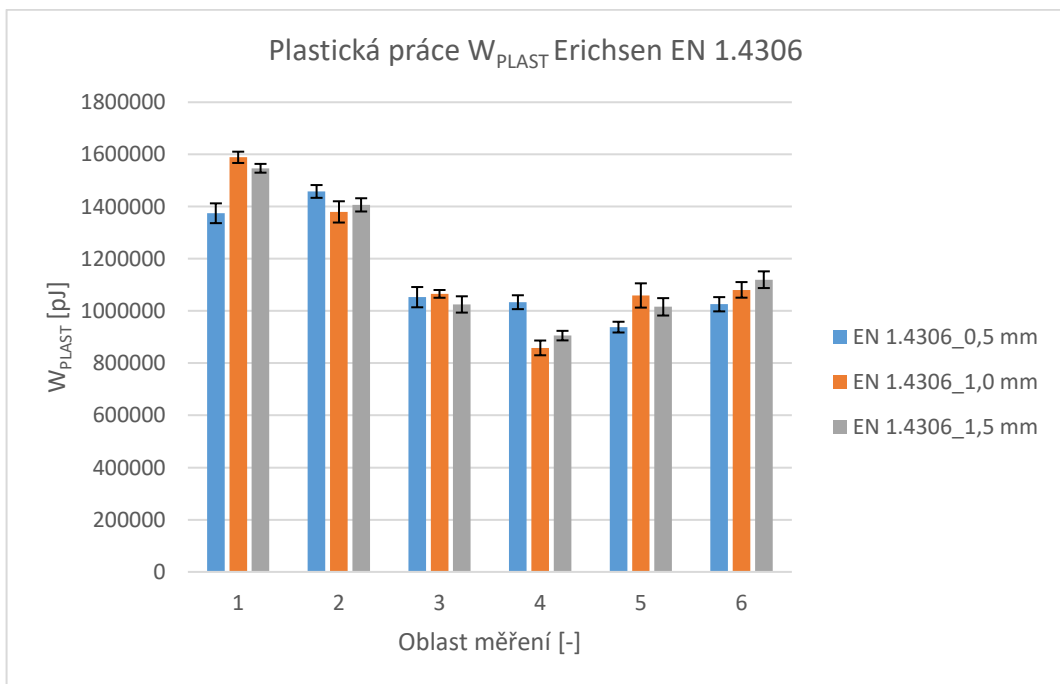
Erichsen

Plastická práce materiálu DC03 zaznamenala opačnou změnu v porovnání s elastickou prací, která se v oblastech 4, 5 a 6 zvětšovala. Plastická práce v těchto oblastech klesla. Tato změna se dá považovat u všech tloušťek plechu obdobná.



Obr. 104. Graf plastické práce Erichsen DC03

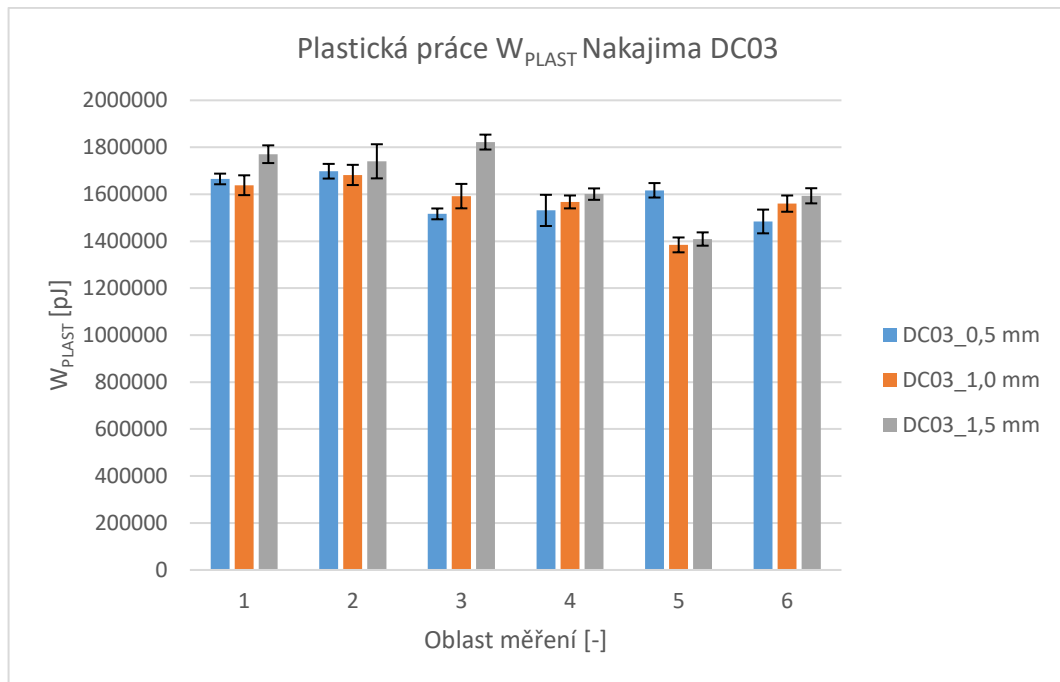
Plastická práce materiálu EN 1.4306 se postupně snižovala od oblasti 1 k oblasti 3. Po tomto snížení nastal mírný nárůst. Toto chování se ukázalo u všech tloušťek materiálu.



Obr. 105. Graf plastická práce Erichsen EN 1.4306

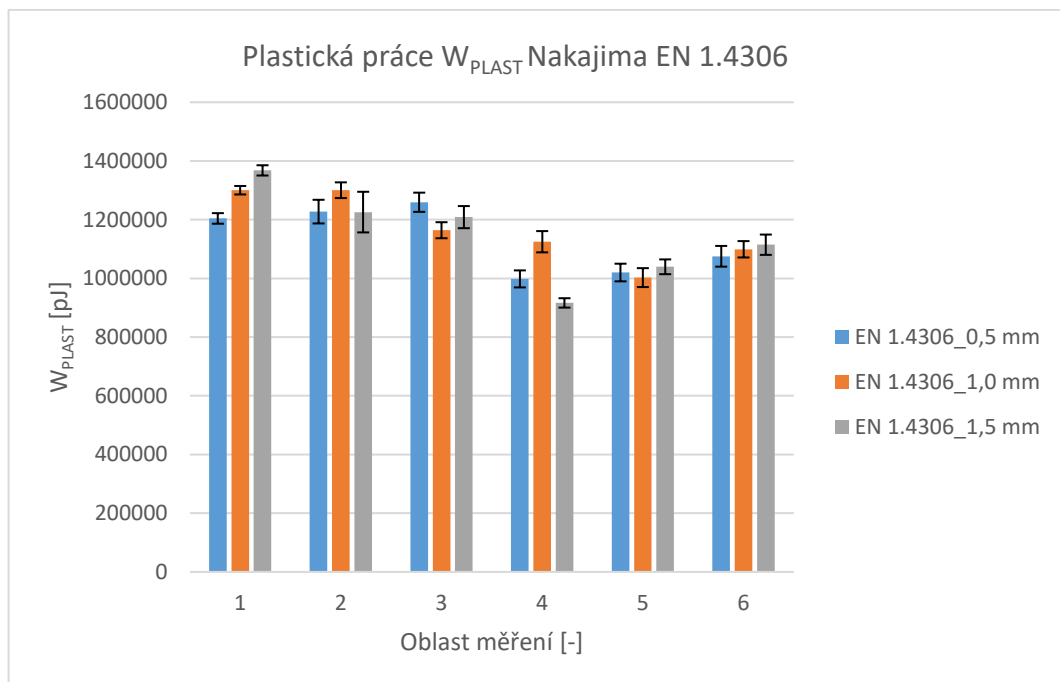
Nakajima

Výsledky plastické práce materiálu DC03 zobrazily obdobné chování nezávisle na tloušťce plechu. Kdy docházelo k postupnému poklesu hodnoty směrem k vrcholku kopule.



Obr. 106. Graf plastické práce Nakajima DC03

U materiál EN 1.4306 došlo ke stejnému chování nezávisle na tloušťce plechu stejně jako v případě materiálu DC03.



Obr.107. Graf plastické práce Nakajima EN 1.4306

13 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Data ze zařízení BUP 600 zobrazily, že u obou materiálů s rostoucí tloušťkou plechu roste síla i hloubka tahu, při které došlo k porušení. Dále je zřejmé, že hodnota síly, při které došlo k porušení je v případě materiálu EN 1.4306 zřetelně vyšší v porovnání s materiálem DC03. Stejně tak hodnota hloubky tahu, při které došlo k porušení je v případě materiálu EN 1.4306 vyšší v porovnání s materiálem DC03.

Výsledek simulace ztenčení poukazuje, že k maximálním změnám tloušťky stěny dochází v průběhu tahu kopule, až po její vrchol. Výsledek zobrazil největší ztenčení 30 %. Dále výsledek simulace poukazoval, že u materiálu EN 1.4306 dosahoval maximálních hodnot ztenčení v nižších oblastech tahu v porovnání s materiálem DC03.

Výsledek maximálního porušení zobrazil oblast horní část kopule jako oblast vzniku praskliny. Dále je z výsledků zřejmé, že oblasti porušení u materiálu DC03 jsou posunuty více k vrcholku kopule. Zatímco oblasti porušení materiálu EN 1.4306 jsou níže.

K stejným výsledkům dospěl i výsledek simulace tvářitelnosti, že oblasti vzniku trhliny u materiálu DC03 jsou posunuty výše k vrcholku kopule v porovnání s materiálem EN 1.4306. Všechny tyto výsledky odpovídají skutečnosti, kdy u všech výtažků došlo ke vzniku trhliny v horní části kopule.

Hodnoty mikrotvrdomosti podle Vickerse u materiálu DC03 taženého podle Erichsena postupně rostly v průběhu tahu. Plech tloušťky 1,5 mm nabyl maxima v oblasti měření 4 a plechy tloušťky 1,0 mm a 0,5 mm dosáhly maximální hodnoty mikrotvrdomosti v oblasti měření 5. Tyto oblasti odpovídají místům vzniku trhlin. Materiál EN 1.4306 vykazoval podobné chování jako materiál DC03 s rozdílem maximálních hodnot mikrotvrdomosti, kdy materiál EN 1.4306 dosáhl téměř dvojnásobných hodnot v porovnání s materiálem DC03.

U metody Nakajima nastal nárůst mikrotvrdomosti za brzdící drážkou. Materiál DC03 dosáhl maximálních hodnot v měřicích oblastech 5 a 6. Materiál EN 1.4306 dosáhl maxima v oblastech 4 a 5. Tyto výsledky potvrdily výsledky simulací, že u materiálu DC03 vzniknou trhliny více na vrcholu kopule v porovnání s materiálem EN 1.4306.

Výsledky modulu pružnosti materiálu DC03 zobrazily v oblasti měření 1 téměř shodnou hodnotu modulu pružnosti pro všechny tloušťky. U plechu tloušťky 0,5 mm došlo k postupnému poklesu modulu pružnosti do oblasti 4, kde dosáhl minima, poté zaznamenal nárůst směrem k vrcholku kopule. Vzorčky tloušťky 1,0 mm a 1,5 mm zaznamenaly nárůst

modulu pružnosti v oblastech měření 2 a 3, kde dosáhly maximálních hodnot. Po dosažení maxima došlo k prudkému poklesu. Materiál EN 1.4306 v porovnání s materiálem DC03 vykazoval menší rozdíly mezi maximálními a minimálními hodnotami modulu pružnosti.

Vzorek DC03 0,5 mm tažený metodou Nakajima zaznamenal nárůst modulu pružnosti v oblasti brzdící drážky (oblast 2) a v oblasti za brzdící drážkou (oblast 3). Dále následoval pokles směrem k vrcholku kopule. U vzorků 1,0 mm a 1,5 mm došlo k mírnému poklesu modulu v oblastech 4 a 6. V ostatních oblastech byla naměřena téměř shodná hodnota modulu. U plechu EN 1.4306 0,5 mm došlo k skokovému snížení modulu pružnosti v oblasti vrcholku kopule (oblast 6). U plechů 1,0 mm a 1,5 mm nedošlo k žádné výrazné změně modulu.

U výsledku elastické práce materiálu DC03 taženým metodou podle Erichsena nastalo k výrazným nárůstům elastické práce. V případě plechu tloušťky 0,5 mm v oblasti 4 a u plechu tloušťky 1,5 mm v oblasti 5. K největší změně došlo v oblasti měření 6 v případě plechu tloušťky 1,0 mm. Tento nárůst souvisí s poklesem modulu pružnosti, který byl zmíněn výše. Materiál EN 1.4306 nezaznamenal výrazné změny v vtiskovém modulu pružnosti, tudíž nedošlo ani k výrazným změnám elastické práce jako u materiálu DC03. Jediná výraznější změna nastala v oblasti měření 4 u plechu 0,5 mm, kdy se hodnota plastické práce zdvojnásobila.

Plech DC03 tažené metodou Nakajima tloušťky 1,0 mm a 1,5 mm nezaznamenaly výrazné rozdíly v elastické práci. Jenom u plechu tloušťky 0,5 mm došlo k postupnému snížení mezi oblastí 1 a 3 a poté nastal nárůst hodnoty elastické práce. Tyto změny opět odpovídají změnám modulu pružnosti. Plechy z materiálu EN 1.4306 zaznamenaly minimální rozdíly v změnách elastické práce mezi oblastmi měření. Jediný výrazný rozdíl nastal v oblasti měření 6 plechu 0,5 mm. V této oblasti nastal nárůst elastické energie.

Výsledek plastické práce materiálu DC03 taženým metodou podle Erichsena zaznamenal pokles v oblastech 4, 5 a 6. Tato změna se dá považovat u všech tlouštěk plechu obdobná. Plastická práce materiálu EN 1.4306 se postupně snižovala od oblasti 1 k oblasti 3. Po tomto snížení nastal mírný nárůst. Toto chování se ukázalo u všech tlouštěk materiálu.

Výsledky plastické práce materiálu DC03 a EN 1.4306 tažené metodou Nakajima zobrazily obdobné chování nezávisle na tloušťce plechu. Kdy došlo k postupnému poklesu hodnoty směrem k vrcholku kopule.

ZÁVĚR

Ze začátku praktické části byly zvoleny plechy, konkrétně plechy z materiálu DC03 a EN 1.4306. V obou případech byly zvoleny plechy tloušťek 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. Z každého plechu byly vytaženy tři vzorky metodou podle Erichsena s použitým tažníkem o průměru 18 mm. Stejným způsobem byly vytaženy vzorky metodou Nakajima s použitým tažníkem o průměru 60 mm. Tažení vzorků proběhlo na zařízení BUP 600. Z tohoto tažení byly prezentovány výsledky závislosti hloubky tahu na velikosti tažné síly, z kterých jde vidět jak volba materiálu a tloušťka plechu ovlivňuje výsledný proces tažení.

V dalším kroku se vytvořily simulace pro každý vzorek. Nastavené parametry simulací odpovídají parametrům reálného procesu tažení. V diplomové práci je popsán postup nastavení jednotlivých simulací a vyhodnocení výsledků. Z mnoha výsledků, které simulační software nabízí, byly vybrány tvářitelnost (FLD), porušení (Max Failure) a ztenčení (Thinning). Simulace byly vytvořeny v softwaru Autoform R8.

Z vytažených vzorků na zařízení BUP 600 byly připraveny vzorky, tak aby bylo možné měřit změnu mechanických vlastností v jednotlivých oblastech výtažku. Pro metodu podle Erichsena byla zvolena oblast neovlivněná hlubokým tažením, mírně ovlivněná hlubokým tažením, počátku hlubokého tahu (spodní rádius), spodního průběhu hlubokého tahu, horního průběhu hlubokého tahu, vrcholu hlubokého tahu. Pro metodu Nakajima byla zvolena oblast před brzdící drážkou, brzdící drážky, za brzdící drážkou, počátku hlubokého tahu (spodní rádius), průběhu hlubokého tahu, vrcholu hlubokého tahu. V prvním kroku přípravy byly jednotlivé výtažky rozřezány. Následně došlo k zalisování do pryskyřice a vybroušení vzorků.

V poslední fázi praktické části se měřily mechanické vlastnosti v jednotlivých oblastech vzorků. Měření mechanických vlastností proběhlo na zařízení Micro-Combi Tester od firmy CSM. Z tohoto zařízení se získaly výsledky tvrdosti podle Vickerse HV_{IT} , modul pružnosti E_{IT} , elastická práce W_{ELAST} a plastická práce W_{PLAST} . Vyhodnocení dat ukázalo, že v kritických místech dosahuje tvrdost podle Vickerse HV_{IT} maximálních hodnot, modul pružnosti E_{IT} naopak hodnot minimálních a v závislosti na tomto modulu se mění podíl elastická práce W_{ELAST} a plastická práce W_{PLAST} . Po vyhodnocení změn mechanických výsledků došlo k porovnání reality a simulace. Toto porovnání ukázalo pouze minimální rozdíly.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 9788086960265.
- [2] HODIS, Zdeněk. *Strojírenská technologie*. Brno: Masarykova univerzita, 2013. ISBN 978-80-210-6256-6.
- [3] HU, Ping, Ning MA, Li-zhong LIU a Yi-guo ZHU. *Theories, Methods and Numerical Technology of Sheet Metal Cold and Hot Forming* [online]. London: Springer London, 2013 [cit. 2022-12-06]. Springer Series in Advanced Manufacturing. ISBN 978-1-4471-4098-6. Dostupné z: doi:10.1007/978-1-4471-4099-3
- [4] BENEŠOVÁ, Soňa; BERNÁŠEK, Vladimír. *Technologie tváření*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. 91 s. ISBN 978-80-261-0449-0.
- [5] *Technologie tváření kovů* [online]. Technická univerzita Liberec, Fakulta strojní [cit. 2022-12-06]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [6] ÖZGÜR, Atilla, Yilmaz UYGUN a Marc-Thorsten HÜTT. A review of planning and scheduling methods for hot rolling mills in steel production. *Computers & Industrial Engineering* [online]. 2021, **151** [cit. 2022-12-06]. ISSN 03608352. Dostupné z: doi:10.1016/j.cie.2020.106606
- [7] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. ISBN 9788021447479.
- [8] GUSTAFSSON, E., M. OLDENBURG a A. JANSSON. Experimental study on the effects of clearance and clamping in steel sheet metal shearing. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2016, **229**, 172-180 [cit. 2022-12-07]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2015.09.004
- [9] 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. 2022-12-15]. ISSN 0944-6524. Dostupné z: doi:10.1007/s11740-007-0025-9
- [10] 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. 2023-01-02]. ISSN 09215093. Dostupné z: doi:10.1016/j.msea.2020.140023

[11] 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. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>

[12] Rozdělení ocelí pro automobilový průmysl. Workswell [online]. Česká Republika, 2020, 2020 [cit. 2023-01-02]. Dostupné z: <https://workswell.cz/rozdeleni-oceli-pro-automobilovy-prumysl>

[13] 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. 2023-01-02]. ISSN 00207683. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijsolstr.2005.06.076

[14] 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. 2023-01-02]. ISSN 0026-0673. Dostupné z: doi:10.1007/s11041-014-9708-y

[15] FAN, J., J. W. QIAO, Z. H. WANG, W. RAO a G. Z. KANG. Twinning-induced plasticity (TWIP) and work hardening in Ti-based metallic glass matrix composites. *Scientific Reports* [online]. 2017, **7**(1) [cit. 2023-01-02]. ISSN 2045-2322. Dostupné z: doi:10.1038/s41598-017-02100-9

[16] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.

[17] KOCAŇDA, A. a C. JASIŃSKI. 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. 2022-09-09]. ISSN 16449665. Dostupné z: doi:10.1016/j.acme.2015.10.007

[18] PAUL, Surajit Kumar. A critical review on hole expansion ratio. *Materialia* [online]. 2020, **9** [cit. 2022-09-09]. ISSN 25891529. Dostupné z: doi:10.1016/j.mtla.2019.100566

- [19] PANICH, Sansot, Nopparat SEEMUANG a Taratip CHAIMONGKON. Formability Analysis of Fukui Stretch-Drawing and Square Cup Drawing Using Strain and Stress Based Forming Limit Curves. *Key Engineering Materials* [online]. 2017, **751**, 167-172 [cit. 2023-01-16]. ISSN 1662-9795. Dostupné z: doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.751.167
- [20] KAYA, S., T. ALTAN, P. GROCHE a C. KLÖPSCH. Determination of the flow stress of magnesium AZ31-O sheet at elevated temperatures using the hydraulic bulge test. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2008, **48**(5), 550-557 [cit. 2023-01-16]. ISSN 08906955. Dostupné z: doi:10.1016/j.ijmachtools.2007.06.011
- [21] BEN GHORBAL, Ghailen, Arnaud TRICOTEAUX, Anthony THUAULT, Ghislain LOUIS a Didier CHICOT. Comparison of conventional Knoop and Vickers hardness of ceramic materials. *Journal of the European Ceramic Society* [online]. 2017, **37**(6), 2531-2535 [cit. 2023-01-17]. ISSN 09552219. Dostupné z: doi:10.1016/j.jeurceramsoc.2017.02.014
- [22] GUO, Bicheng, Libin ZHANG, Liang CAO, Tao ZHANG, Feng JIANG a Lan YAN. The correction of temperature-dependent Vickers hardness of cemented carbide base on the developed high-temperature hardness tester. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2018, **255**, 426-433 [cit. 2023-01-17]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/j.jmatprotec.2017.12.041
- [23] BROITMAN, Esteban. Indentation Hardness Measurements at Macro-, Micro-, and Nanoscale: A Critical Overview. *Tribology Letters* [online]. 2017, **65**(1) [cit. 2023-01-17]. ISSN 1023-8883. Dostupné z: doi:10.1007/s11249-016-0805-5
- [24] SHAW, Milton C. a Gabriel J. DESALVO. The Role of Elasticity in Hardness Testing. *Metallography, Microstructure, and Analysis* [online]. 2012, **1**(6), 310-317 [cit. 2023-01-18]. ISSN 2192-9262. Dostupné z: doi:10.1007/s13632-012-0047-3
- [25] PAN, Hongbo, Xiaohui SHEN, Dongyang LI, et al. Effect of Annealing Process on Microstructure, Texture, and Mechanical Properties of a Fe-Si-Cr-Mo-C Deep Drawing Dual-Phase Steel. *Crystals* [online]. 2020, **10**(9) [cit. 2023-01-18]. ISSN 2073-4352. Dostupné z: doi:10.3390/cryst10090777
- [26] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. *Strojírenská technologie 1*. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002. ISBN 80-7183-265-0.

- [27] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2013. ISBN 978-80-261-0260-1.
- [28] BOS, C., M.G. MECOZZI a J. SIETSMA. A microstructure model for recrystallisation and phase transformation during the dual-phase steel annealing cycle. *Computational Materials Science* [online]. 2010, **48**(3), 692-699 [cit. 2023-01-23]. ISSN 09270256. Dostupné z: doi:10.1016/j.commatsci.2010.03.010
- [29] BRUSCHI, S., T. ALTAN, D. BANABIC, et al. Testing and modelling of material behaviour and formability in sheet metal forming. *CIRP Annals* [online]. 2014, **63**(2), 727-749 [cit. 2023-01-23]. ISSN 00078506. Dostupné z: doi:10.1016/j.cirp.2014.05.005
- [30] OLIVEIRA, Marta C. a José V. FERNANDES. Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes. *Metals* [online]. 2019, **9**(12) [cit. 2023-01-23]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9121356
- [31] FRODLOVÁ, Barbora, Radek ČADA a Jakub MACHÁLEK. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru Dynaform: studijní opora*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012. ISBN 978-80-248-2714-8.
- [32] FRODLOVÁ, Barbora, Radek ČADA a Barbora FRODLOVÁ. *Simulace procesů plošného tváření v software PAM-STAMP: učební text předmětu "Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody ve tváření"*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2011. ISBN 978-80-248-2715-5.
- [33] FIRAT, M. Computer aided analysis and design of sheet metal forming processes: Part I – The finite element modeling concepts. *Materials & Design* [online]. 2007, **28**(4), 1298-1303 [cit. 2023-01-23]. ISSN 02613069. Dostupné z: doi:10.1016/j.matdes.2006.01.026
- [34] GANTAR, Gašper, Tomaž PEPELNJAK a Karl KUZMAN. Optimization of sheet metal forming processes by the use of numerical simulations. *Journal of Materials Processing Technology* [online]. 2002, **130-131**, 54-59 [cit. 2023-01-23]. ISSN 09240136. Dostupné z: doi:10.1016/S0924-0136(02)00786-0
- [35] TAWARE R, RAJMANE V. *Design and Forming Analysis of BIW Sheet Metal Component Using Autoform Simulation Software*. [online]. 2021, 2(4), 194-201 [cit. 2023-01-23]. Dostupné z: <https://journals.resaim.com/ijramt/article/view/721>
- [36] SAFDARIAN, R. Stress based forming limit diagram for formability characterization of 6061 aluminum. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China* [online].

2016, **26**(9), 2433-2441 [cit. 2023-01-23]. ISSN 10036326. Dostupné z: doi:10.1016/S1003-6326(16)64350-9

[37] *DC03 1.0347* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <https://www.thyssenkrupp-materials-processing-europe.com/en/c-steel/cold-rolled-sheet/dco1-dc07/dc03>

[38] *1.4306 (AISI 304 L), S30403 Datasheet METALCOR* [online]. [cit. 2023-03-31]. Dostupné z: <http://www.metalcor.de/en/datenblatt/6/>

[39] *Měřicí, kontrolní a testovací stroje, měřidla, optické přístroje, snímače, měřící ústředny – Fakulta technologická* [online]. [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://ft.utb.cz/ustav-vyrobnihoinzenyrstvi/veda-a-vyzkum/pristrojove-vybaveni/merici-kontrolni-a-testovaci-stroje/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Jednotka	Význam symbolu
α	[°]	Úhel ohybu
γ	[°]	Úhel odpružení
S	[mm^2]	Plocha
F	[N]	Síla
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
F_c	[N]	Celková tažná síla
F_t	[N]	Tažná síla
F_p	[N]	Síla přidržovače
L	[mm]	Délka
S_p	[mm^2]	Plocha přidržovače
p	[MPa]	Tlak
A	[J]	Velikost práce
C	[–]	Koeficient zaplnění plochy
h	[mm]	Výška
d	[mm]	Průměr výtažku
D_0	[mm]	Průměr přístřihu
m	[–]	Součinitel tažení
K	[–]	Stupeň tažení
r	[mm]	Poloměr zaoblení
R_{p02}	[MPa]	Mez kluzu
A_{80}	[%]	Tažnost
T	[–]	Kritérium hlubokotažnosti podle Gross – Engelharta
q	[–]	Kritérium hlubokotažnosti podle Siebela a Pompa
m_F	[–]	Kritérium hlubokotažnosti podle Fukuiho
HV	[MPa]	Tvrдость podle Vickerse
HRA	[MPa]	Tvrдость podle Rockwella
HRB	[MPa]	Tvrдость podle Rockwella
HRC	[MPa]	Tvrдость podle Rockwella

HB	[MPa]	Tvrдость podle Brinella
HV_{IT}	[Vickers]	Mikrotvrдость podle Vickerse
E_{IT}	[GPa]	Vtiskový modul pružnosti
W_{ELAST}	[pJ]	Elastická práce
W_{PLAST}	[pJ]	Plastická práce
IF		Interstitial Free – druh nízkopevnostní oceli
BH		Bake Hardenable – druh vysokopevnostní oceli
IF-HS		Interstitial Free – High Strenght – druh vysokopevnostní oceli
HSLA		High Strenght Low Alloy – druh vysokopevnostní oceli
DP		Dual Phase – druh pokročilé vysokopevnostní oceli
CP		Complex Phase – druh pokročilé vysokopevnostní oceli
TRIP		Transformation Induced Plasticity – druh pokročilé vysokopevnostní oceli
TWIP		Twinning Induced Plasticity – druh pokročilé vysokopevnostní oceli
MS		Martensitic Steel – druh pokročilé vysokopevnostní oceli
FLD		Diagram mezní tvářitelnosti
Ti		Titan – chemický prvek
Nb		Niob – chemický prvek
C		Uhlík – chemický prvek
N		Dusík – chemický prvek
Mn		Mangan – chemický prvek
Cr		Chrom – chemický prvek
Mo		Molybden – chemický prvek
V		Vanad – chemický prvek
Ni		Nikl – chemický prvek
Al		Hliník – chemický prvek
Si		Křemík – chemický prvek
P		Fosfor – chemický prvek
S		Síra – chemický prvek

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 1. Zápustkové kování [4]</i>	14
<i>Obr. 2. Válcování [5]</i>	14
<i>Obr. 3. Princip protlačování [4]</i>	15
<i>Obr. 4. Deformační pásma při stříhání [5]</i>	16
<i>Obr. 5. Průběh napětí a posunutí neutrální osy [5]</i>	17
<i>Obr. 6. Odpružení materiálu [4]</i>	18
<i>Obr. 7. Tažný nástroj [4]</i>	18
<i>Obr. 8. Schéma napětí a deformace při tažení s přidržovačem [4]</i>	19
<i>Obr. 9. Průběh tažné síly [4]</i>	20
<i>Obr. 10. Tažení výrobku na tři tahy [4]</i>	21
<i>Obr. 11. Tažný nástroj [9]</i>	24
<i>Obr. 12. Vložka tažné hrany (vlevo) a brzdící lišta (vpravo) [5]</i>	24
<i>Obr. 13. Graf závislosti pevnosti v tahu na tažnosti pro různé druhy ocelí [10]</i>	27
<i>Obr. 14. Struktura IF oceli [12]</i>	28
<i>Obr. 15. Struktura DP oceli [12]</i>	30
<i>Obr. 16. Struktura CP oceli [12]</i>	30
<i>Obr. 17. Struktura TRIP oceli [12]</i>	31
<i>Obr. 18. Struktura TWIP oceli [12]</i>	31
<i>Obr. 19. Struktura MS oceli [12]</i>	32
<i>Obr. 20. Nástroj při Erichsenově zkoušce [17]</i>	34
<i>Obr. 21. Tvar trhliny při Erichsenově zkoušce [7]</i>	34
<i>Obr. 22. Princip kališkovací zkoušky [7]</i>	35
<i>Obr. 23. Průběh tažné síly během Gross – Engelhardtovi zkoušky [7]</i>	36
<i>Obr. 24. Princip Gross – Engelhardtovi zkoušky [7]</i>	36
<i>Obr. 25. Princip zkoušky rozšiřování otvoru podle Siebela a Pompa [7]</i>	37
<i>Obr. 26. Princip Fukuiho zkoušky [7]</i>	38
<i>Obr. 27. Princip hydraulické zkoušky [7]</i>	39
<i>Obr. 28. Princip Vickersovi zkoušky [22]</i>	40
<i>Obr. 29. Princip Rockwellovi zkoušky [23]</i>	41
<i>Obr. 30. Princip Brinellovi zkoušky [23]</i>	42
<i>Obr. 31. Porovnání vtisku Knoop a Vickerse [23]</i>	43
<i>Obr. 32. Průběh tepelného zpracování [26]</i>	44
<i>Obr. 33. Oblasti žíhacích teplot v rovnovážném diagramu Fe – Fe₃C [26]</i>	45
<i>Obr. 34. Vývoj struktury během žíhání [28]</i>	46

<i>Obr. 35. Nadefinovaný tažník a přístřih plechu.....</i>	<i>48</i>
<i>Obr. 36. Výsledek lisovatelnosti v softwaru AutoForm</i>	<i>49</i>
<i>Obr. 37. Diagram mezní tváritelnosti v softwaru AutoForm.....</i>	<i>50</i>
<i>Obr. 38. Výsledek porušení v softwaru AutoForm.....</i>	<i>51</i>
<i>Obr. 39. Výsledek zvlnění v softwaru AutoForm</i>	<i>52</i>
<i>Obr. 40. Výsledek ztenčení v softwaru AutoForm</i>	<i>53</i>
<i>Obr. 41. Zařízení BUP 600 Zwick/Roell.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 42. Vlevo prostor tažníku, vpravo ovládaní BUP 600.....</i>	<i>59</i>
<i>Obr. 43. Vytažené vzorky materiálu DC03</i>	<i>60</i>
<i>Obr. 44. Vytažené vzorky materiálu EN 1.4306</i>	<i>61</i>
<i>Obr. 45. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu podle Erichsena DC03.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 46. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu podle Erichsena EN 1.4306</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 47. Vytažené vzorky materiálu DC03</i>	<i>64</i>
<i>Obr. 48. Vytažené vzorky materiálu EN 1.4306</i>	<i>65</i>
<i>Obr. 49. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu Nakajima DC03</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 50. Graf závislosti tažné síly na hloubce tahu pro metodu Nakajima EN 1.4306.....</i>	<i>67</i>
<i>Obr. 51. Modely dílů.....</i>	<i>68</i>
<i>Obr. 52. Import dílu a určení směru tažení</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 53. Automatic Tipping</i>	<i>69</i>
<i>Obr. 54. Přiřazení materiálu a zadání tloušťky dílu.....</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 55. Výrobní plán</i>	<i>70</i>
<i>Obr. 56. Tažník</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 57. Nastavení geometrie tažníku</i>	<i>71</i>
<i>Obr. 58. Přístřih plechu.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 59. Brzdící drážka.....</i>	<i>72</i>
<i>Obr. 60. Profil a rozměry brzdící drážky.....</i>	<i>73</i>
<i>Obr. 61. Popis oblastí FLD diagramu.....</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 62. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 0,5 mm, DC03</i>	<i>74</i>
<i>Obr. 63. FLD diagram Erichsen – 1,0 mm, DC03</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 64. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,5 mm, DC03</i>	<i>75</i>
<i>Obr. 65. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 0,5 mm, EN 1.4306.....</i>	<i>76</i>
<i>Obr. 66. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,0 mm, EN 1.4306.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 67. FLD diagram a porovnání simulace a reality Erichsen – 1,5 mm, EN 1.4306.....</i>	<i>77</i>
<i>Obr. 68. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 0,5 mm, DC03.....</i>	<i>78</i>

<i>Obr. 69. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,0 mm, DC03</i>	79
<i>Obr. 70. FLD diagrama porovnání simulace a reality Nakajima – 1,5 mm, DC03</i>	79
<i>Obr. 71. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 0,5 mm, EN 1.4306</i> ...	80
<i>Obr. 72. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,0 mm, EN 1.4306</i> ...	81
<i>Obr. 73. FLD diagram a porovnání simulace a reality Nakajima – 1,5 mm, EN 1.4306</i> ...	81
<i>Obr. 74. Stupnice porušení (Max failure)</i>	82
<i>Obr. 75. Porušení (Max failure) pro metodu podle Erichsena a materiál DC03</i>	82
<i>Obr. 76. Porušení (Max failure) pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306</i>	83
<i>Obr. 77. Porušení (Max failure) pro metodu Nakajima a materiál DC03</i>	83
<i>Obr. 78. Porušení (Max failure) pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306</i>	84
<i>Obr. 79. Stupnice ztenčení (Thinning)</i>	84
<i>Obr. 80. Ztenčení (Thinning) pro metodu podle Erichsena a materiál DC03</i>	85
<i>Obr. 81. Ztenčení (Thinning) pro metodu podle Erichsena a materiál EN 1.4306</i>	85
<i>Obr. 82. Ztenčení (Thinning) pro metodu Nakajima a materiál DC03</i>	85
<i>Obr. 83. Ztenčení (Thinning) pro metodu Nakajima a materiál EN 1.4306</i>	86
<i>Obr. 84. Rozřezané výtázky</i>	87
<i>Obr. 85. Pila IsoMet 4000</i>	87
<i>Obr. 86. Lis SimpliMet 1000 a pryskyřice PhenoCure</i>	88
<i>Obr. 87. Leštička vzorků AutoMet 250</i>	89
<i>Obr. 88. Vybroušené vzorky</i>	89
<i>Obr. 89. Měřicí oblasti pro metodu podle Erichsena</i>	90
<i>Obr. 90. Měřicí oblasti pro metodu Nakajima</i>	91
<i>Obr. 91. Micro-Combi Tester</i>	92
<i>Obr. 92. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse Erichsen DC03</i>	93
<i>Obr. 93. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse Erichsen EN 1.4306</i>	94
<i>Obr. 94. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse Nakajima DC03</i>	94
<i>Obr. 95. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse Nakajima EN 1.4306</i>	95
<i>Obr. 96. Graf vtiskového modulu pružnosti Erichsen DC03</i>	96
<i>Obr. 97. Graf vtiskového modulu pružnosti Erichsen EN 1.4306</i>	97
<i>Obr. 98. Graf vtiskového modulu pružnosti Nakajima DC03</i>	97
<i>Obr. 99. Graf vtiskového modulu pružnosti Nakajima EN 1.4306</i>	98
<i>Obr. 100. Graf elastické práce Erichsen DC03</i>	99
<i>Obr. 101. Graf elastické práce Erichsen EN 1.4306</i>	99
<i>Obr. 102. Graf elastické práce Nakajima DC03</i>	100
<i>Obr. 103. Graf elastické práce Nakajima EN 1.4306</i>	101

<i>Obr. 104. Graf plastické práce Erichsen DC03</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 105. Graf plastická práce Erichsen EN 1.4306.....</i>	<i>102</i>
<i>Obr. 106. Graf plastické práce Nakajima DC03</i>	<i>103</i>
<i>Obr.107. Graf plastické práce Nakajima EN 1.4306</i>	<i>103</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 1. Vybrané hodnoty C [7]</i>	<i>21</i>
<i>Tab. 2. Mechanické vlastnosti nízkopevnostních ocelí [12].....</i>	<i>27</i>
<i>Tab. 3. Mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí [12]</i>	<i>28</i>
<i>Tab. 4. Mechanické vlastnosti vysokopevnostních ocelí [12]</i>	<i>29</i>
<i>Tab. 5. Chemické složení oceli DC03 [37]</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 6. Mechanické vlastnosti oceli DC03 [37].....</i>	<i>56</i>
<i>Tab. 7. Chemické složení oceli EN 1.4306 [38].....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 8. Mechanické vlastnosti oceli EN 1.4306 [38].....</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 9. Základní parametry zařízení BUP 600 Zwick/Roell [39]</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 10. Parametry metody podle Erichsena</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 11. Výsledné parametry jednotlivých tahů metodou podle Erichsena.....</i>	<i>62</i>
<i>Tab. 12. Parametry metody Nakajima</i>	<i>64</i>
<i>Tab. 13. Výsledné parametry jednotlivých tahů metodou Nakajima</i>	<i>66</i>

