

Testování tažnosti hliníkových plechů a vliv této technologie na mechanické vlastnosti

Bc. Ondřej Surovčák

Diplomová práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Ondřej Surovčák
Osobní číslo:	T22389
Studijní program:	N3909 Procesní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Testování tažnosti hliníkových plechů a vliv této technologie na mechanické vlastnosti

Zásady pro vypracování

- Vypracovat literární studii na dané téma.
- Výběr hliníkových plechů pro hluboké tažení.
- Provedení výroby dílů s různými podmínkami hlubokého tažení plechů.
- Provedení měření mechanických vlastností.
- Vyhodnocení naměřených hodnot.

Forma zpracování diplomové práce: **tisková/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 2024**
Termín odevzdání diplomové práce: **10. května 2024**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 27. února 2024

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

Ve Zlíně dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá testováním tažnosti hliníkových plechů a jejím vlivem na mechanické vlastnosti. V teoretické části je nejprve popsáno rozdělení hliníkových plechů. Poté se práce zabývá technologií tváření se zaměřením na hluboké tažení. Problematika této technologie hraje důležitou roli v této diplomové práci, a proto je důkladněji rozebrána. Další důležitou částí jsou mechanické a technologické zkoušky plechů.

V praktické části podstoupí vybraný hliníkový plech technologické zkoušky podle Erichsena a Nakajimi. Poté bude vytvořena simulace hlubokého tažení v softwaru AutoForm R8 a tyto výsledky budou porovnány s reálnými výsledky. V poslední řadě byly měřeny mechanické vlastnosti v řezu tažených vzorků.

Klíčová slova: hliníkové plechy, hluboké tažení, mikrotvrdość, Erichsen, Nakajima, AutoForm

ABSTRACT

The diploma thesis deals with testing the ductility of aluminum sheets and its effect on mechanical properties. The theoretical part first describes the division of aluminum sheets. The work then deals with forming technology with a focus on deep drawing. The issue of this technology plays an important role in this thesis, and therefore it is analyzed more thoroughly. Other important parts are mechanical and technological tests of sheet metal.

In the practical part, the selected aluminum sheet undergoes technological tests according to Erichsen and Nakajima. A deep drawing simulation will then be created in the AutoForm R8 software and these results will be compared with real results. In the last row, the mechanical properties in the section of the drawn samples were measured.

Key words: aluminum sheets, deep drawing, microhardness, Erichsen, Nakajima, AutoForm

Poděkování:

Děkuji svému vedoucímu Diplomové práce panu doc. Martinu Ovsíkovi, Ph.D. za odborné vedení, za čas strávený nad touto prací, cenné rady a pomoc, při vypracování mé diplomové práce.

„Vždycky je naděje“ Aragorn

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

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 DRUHY HLINÍKOVÝCH PLECHŮ	12
1.1 ZNAČENÍ HLINÍKU A SLITINY HLINÍKU	13
1.1.1 Číselné označování hliníku a jeho slitin.....	14
1.1.2 Chemické označování hliníku a jeho slitin	15
1.1.3 Značení stavů hliníku a jeho slitin	15
1.2 ROZDĚLENÍ SLITIN HLINÍKU	16
1.2.1 Třídy hliníku série 1XXX	16
1.2.2 Třídy hliníku série 2XXX	16
1.2.3 Třídy hliníku série 3XXX	16
1.2.4 Třídy hliníku série 4XXX	17
1.2.5 Třídy hliníku série 5XXX	17
1.2.6 Třídy hliníku série 6XXX	17
1.2.7 Třídy hliníku série 7XXX	17
1.2.8 Třídy hliníku série 8XXX	18
1.2.9 Třídy hliníku série 9XXX	18
2 TVÁŘENÍ	19
2.1 MECHANISMUS PLASTICKÉ DEFORMACE KOVŮ.....	19
2.2 ROZDĚLENÍ TVÁŘENÍ.....	21
2.2.1 Tváření za studena.....	22
2.2.2 Tváření za tepla	23
2.2.3 Tváření za poloohřevu.....	24
2.3 OBJEMOVÉ TVÁŘENÍ.....	24
2.3.1 Kování	24
2.3.2 Válcování	26
2.3.3 Protlačování.....	27
2.3.4 Tažení.....	28
2.4 PLOŠNÉ TVÁŘENÍ.....	28
2.4.1 Stříhání	29
2.4.2 Ohýbání	30
2.4.3 Rovnání	31
3 TECHNOLOGIE HLUBOKÉHO TAŽENÍ	32
3.1 PROCES TAŽENÍ	33
3.2 VZNIK DEFORMACÍ A NAPJATOSTI	34
3.3 PRVKY OVLIVŇUJÍCÍ KONEČNÝ TVAR HLUBOKOTAŽNÝCH VÝROBKŮ	36
3.4 TECHNOLOGICKÉ ZÁSADY	37
3.4.1 Mazání.....	37
3.4.2 Přidržovač a brzdící drážky.....	37

3.5	KONSTRUKCE TVÁŘECÍCH NÁSTROJŮ	39
3.5.1	Tažník.....	40
3.5.2	Tažnice	41
4	MECHANICKÉ VLASTNOSTI.....	42
4.1	ZKOUŠKY TVRDOSTI.....	42
4.1.1	Zkouška tvrdosti podle Brinella	42
4.1.2	Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	43
4.1.3	Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	44
4.2	MIKROTVRDOST	45
4.2.1	Měření mikrotvrdomosti podle Vickerse	45
4.2.2	Měření mikrotvrdomosti podle Knoopu.....	46
5	TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY.....	47
5.1	ZKOUŠKA HLOUBENÍ PODLE ERICHSENA	47
5.2	ZKOUŠKA LDH (NAKAJIMA).....	48
5.3	ZKOUŠKA KALÍŠKOVACÍ (SCHMIEDTOVA).....	49
5.4	ZKOUŠKA PODLE SIEBELA – POMPA	50
5.5	ZKOUŠKA PODLE FUKUIHO.....	51
6	SIMULACE HLUBOKÉHO TAŽENÍ.....	52
6.1	NASTAVENÍ SIMULACE	52
6.2	VÝSLEDKY SIMULACE	53
6.2.1	Tvářitelnost (Formability).....	53
6.2.2	Maximální porušení (Max failure)	53
6.2.3	Ztenčení (Thinning)	54
6.2.4	Zvlnění (Wrinkles).....	55
II	PRAKTICKÁ ČÁST.....	56
7	CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE	57
8	VÝBĚR HLINÍKOVÉHO PLECHU PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ.....	58
8.1	EN AW-1050A	58
9	TAŽENÍ HLINÍKOVÝCH PLECHŮ	59
9.1	ZKUŠEBNÍ STROJ.....	59
9.2	TAŽENÍ VZORKŮ	60
9.2.1	Zkouška podle Erichsena	60
9.2.2	Zkouška podle Nakajimi	61
9.2.3	Výsledky tažení	63
10	SIMULACE TAŽENÍ V PROGRAMU AUTOFORM R8.....	65
10.1	NASTAVENÍ PARAMETRŮ SIMULACE.....	65
10.1.1	Model součásti	65
10.1.2	Materiál a tloušťka plechu.....	65

10.1.3	Volba stroje a výrobního plánu	66
10.1.4	Nastavení tažníku a přidržovače	66
10.1.5	Přístřih plechu	67
10.1.6	Brzdící drážka	67
10.2	VÝSLEDKY SIMULACÍ	68
10.2.1	Erichsen – tloušťka plechu 0,5 mm (EN AW-1050A).....	69
10.2.2	Erichsen – tloušťka plechu 1,0 mm (EN AW-1050A).....	70
10.2.3	Erichsen – tloušťka plechu 1,5 mm (EN AW-1050A).....	70
10.2.4	Nakajima – tloušťka plechu 0,5 mm (EN AW-1050A)	71
10.2.5	Nakajima – tloušťka plechu 1,0 mm (EN AW-1050A)	72
10.2.6	Nakajima – tloušťka plechu 1,5 mm (EN AW-1050A)	73
11	MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ	75
11.1	PŘÍPRAVA VZORKŮ	75
11.2	MĚŘENÍ OBLASTÍ.....	76
11.2.1	Metoda podle Erichsena	76
11.2.2	Metoda podle Nakajima	76
11.3	MĚŘÍCÍ ZAŘÍZENÍ.....	77
11.3.1	Postup měření.....	78
11.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ	78
11.4.1	Vtisková tvrdost H_{IT}	78
11.4.2	Mikrotvrdost podle Vickerse H_{VIT}	81
11.4.3	Vtiskový modul pružnosti E_{IT}	83
11.4.4	Elastická práce W_{ELAST}	85
11.4.5	Plastická práce W_{PLAST}	87
12	DISKUZE VÝSLEDKŮ	90
	ZÁVĚR	94
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	95
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	99
	SEZNAM OBRÁZKŮ	100
	SEZNAM TABULEK.....	103
	SEZNAM PŘÍLOH.....	104

ÚVOD

Hliníkové plechy se stávají stále populárnějšími materiály v průmyslové výrobě, zejména v automobilovém a leteckém průmyslu. Jejich použití je často spojeno s procesem hlubokého tažení, který umožňuje tvarování komplexních a precizních výrobků. Hluboké tažení hliníkových plechů přináší řadu výhod, ale také klade nároky na technologie a materiálové vlastnosti.

Technika hlubokého tažení je složitý proces, který má zásadní vliv na mechanické vlastnosti hliníkových plechů. Při tažení dochází k deformaci materiálu způsobené tlakem a třením, což může ovlivnit pevnost, tažnost a odolnost plechu. Proto je důležité porozumět, jakým způsobem tažení ovlivňuje chování hliníkových plechů a jaké jsou jeho důsledky na jejich mechanické vlastnosti.

Mechanické vlastnosti plechů jsou důležitým kritériem při jejich výrobě a použití. Pevnost materiálu vyjadřuje jeho schopnost odolat vnějšímu zatížení bez trvalé deformace nebo prasknutí. Plasticita se týká schopnosti materiálu změnit tvar bez trvalého poškození. Odolnost vůči deformaci znamená, jak dobře materiál absorbuje energii při deformaci a zamezuje praskání nebo trhání.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 DRUHY HLINÍKOVÝCH PLECHŮ

Hliníkové plechy se staly klíčovým materiálem v širokém spektru průmyslových aplikací díky svým vynikajícím mechanickým vlastnostem, nízké hmotnosti a odolnosti proti korozi. Ne všechny hliníkové plechy jsou však stejné a každý typ má jedinečné vlastnosti, díky nimž jsou vhodné pro specifické aplikace. Chemické složení, mikrostruktura a textura materiálu patří mezi základní materiálové faktory, které v souhrnu ovlivňují tvářitelnost plechu. Také jejich tloušťka a hmotnost hrají velkou roli v použití daného typu hliníkového plechu. [1], [2]

Jedním z nejběžnějších typů je hladký hliníkový plech, který je plochý bez vzorů a textur. Tento typ plechu se běžně využívá ve stavebnictví, automobilovém a leteckém průmyslu, kde je vyžadován elegantní a čistý vzhled.

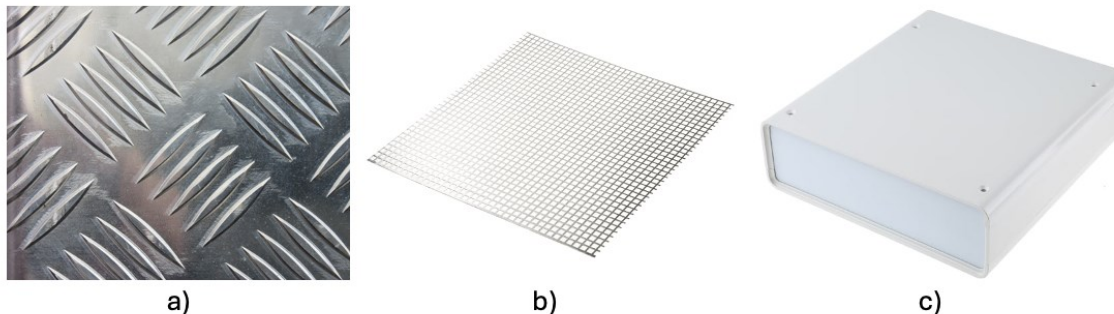
Dalším typem hliníkového plechu je běhounový (protiskluzový) plech, také známý jako kosočtvercový nebo šachovnicový plech. Běhounové plechy mají na povrchu vzor vyvýšených kosočtvercových výstupků, které zvyšují odolnost proti uklouznutí a zlepšují přilnavost. Proto jsou tyto plechy ideální pro použití v trakčních aplikacích, jako jsou schodiště, rampy a lože nákladních automobilů.

Existují také lakované hliníkové plechy, které jsou z estetických důvodů potaženy vrstvou barvy. Barva nejenže dodává plechům barvu, ale také poskytuje další vrstvu ochrany proti korozi a povětrnostním vlivům. Lakované hliníkové plechy se běžně používají v architektonických aplikacích, jako jsou obklady stěn a dekorativní panely, kde estetika hraje zásadní roli.

Hliníkové kompozitní desky nebo panely, někdy nazývané také jako sendvičové panely (často označované zkratkou ACS nebo ACP) se vyrábějí ze dvou velmi tenkých kusů hliníku potaženého sivitky, které jsou z vnější strany spojeny s nehliníkovým jádrem (často plastovým). Tyto desky jsou lehké, a proto se z nich dělají robustní panely, které se používají pro vnější opláštění nebo fasády budov, stejně jako v široké škále izolačních a skládacích panelů. [3]

Kromě těchto typů slouží v různých průmyslových odvětvích ke specifickým účelům i specializované hliníkové plechy, jako jsou perforované plechy, reliéfní plechy a eloxované hliníkové plechy. Perforované plechy mají vyražené otvory, takže jsou vhodné pro aplikace vyžadující větrání nebo filtraci, jako jsou klimatizační systémy a mřížky reproduktorů. Naproti tomu reliéfní plechy mají na povrchu vyvýšené vzory nebo kresby, které plechům

dodávají vizuální zajímavost a strukturu. Eloxované plechy procházejí elektrochemickým procesem zvaným eloxování, který na povrchu vytváří ochrannou vrstvu oxidu, čímž se zvyšuje jejich odolnost proti korozi a trvanlivost. [4]



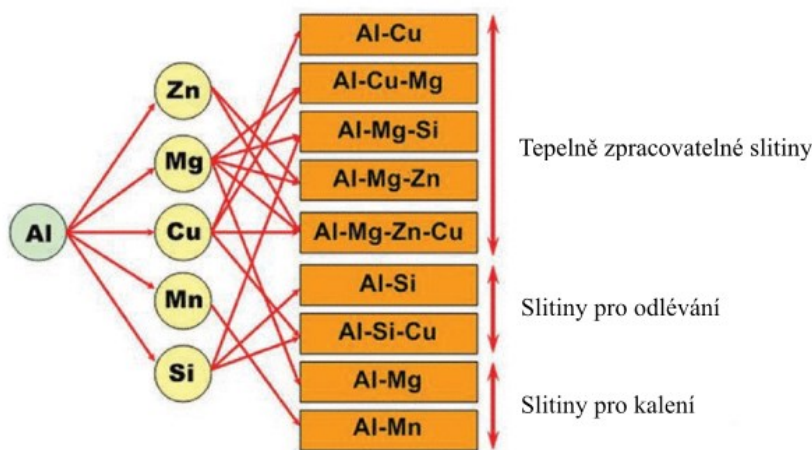
Obrázek 1. a) běhounový (protiskluzový) plech b) perforovaný plech c) eloxovaný plech [3]

Ve formě plechů je k dispozici široká škála hliníkových slitin, jejichž tvářitelnost se liší podle třídy. Slitiny hliníku však obecně nejsou tak tvarovatelné jako například nízkouhlíková ocel. U vysokopevnostních hliníkových slitin je závažným problémem pružný zpětný ráz a to z důvodu vysokého poměru pevnosti k modulu. Pokud se při záměně hliníku za ocel použijí stejné zápustky, dochází často k problémům s tvářením. Tento problém lze vyřešit novou zápustkou. [5]

Hliníkové plechy různých tloušťek se používají v různých oblastech. Tenké plechy lze použít pro osvětlovací zařízení, domácí spotřebiče, jako jsou chladničky nebo mikrovlnné trouby, výtahy a automobilové dekorativní díly; silné plechy lze použít pro letadla, vojenské zásobování, lodní paluby atd. [6]

1.1 Značení hliníku a slitiny hliníku

Hliník a jeho slitiny se podle ČSN EN označují buď číselně nebo chemicky.



Obrázek 2. Hlavní legující prvky v hliníku a typ slitiny [7]

1.1.1 Číselné označování hliníku a jeho slitin

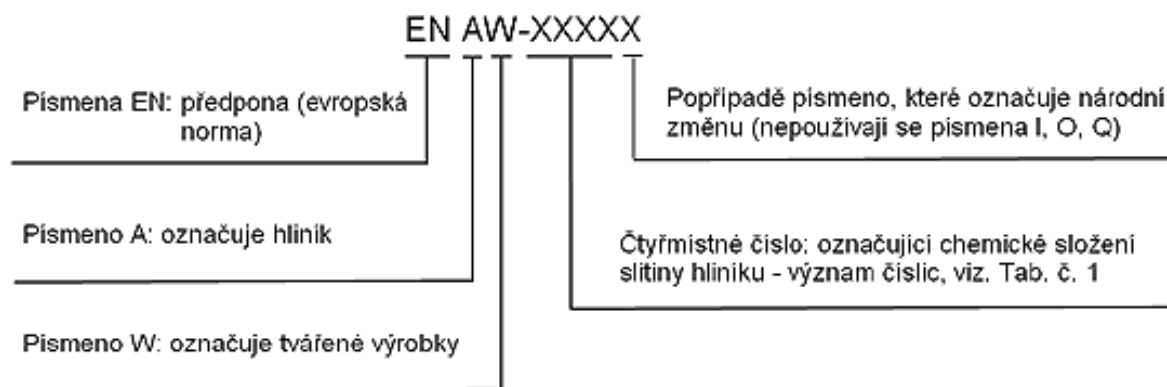
Evropské označení druhu tvářeného hliníku a jeho slitin obsahuje norma ČSN EN 573-1. Po písmenech EN a mezeře následuje písmeno A označující hliník a jeho slitiny (viz. obrázek 3). Následující písmeno označuje:

W – tvářené výrobky (ČSN EN 573-1 až 3).

B – nelegované i legované ingoty na přetavení (ČSN EN 1780).

C – odlitky (označování podle ČSN EN 1706).

M – předslitiny.



Obrázek 3. Číselné označování hliníku a slitiny hliníku [3]

U tvářených výrobků (EN AW) a odlitků (EN AC) a po spojovací čárce následuje čtyřčíslí, které udává chemické složení hliníku a jeho slitiny. Případně použitá pátá číslice v číselném značení označuje uznanou národní variantu. Např. EN AW 1050 znamená Al 99,5%, tedy téměř čistý hliník. [4]

Tabulka 1. Mezinárodní číselný systém označování slitin hliníku

Označení slitiny	Chemické složení
1XXX	Al 99% a více
2XXX	Cu
3XXX	Mn
4XXX	Si
5XXX	Mg

6XXX	Mg+Si
7XXX	Zn
8XXX	Ostatní prvky, např. Li, Sn
9XXX	Neobsazená řada

1.1.2 Chemické označování hliníku a jeho slitin

Chemické označování hliníku a jeho slitin se uvádí v hranatých závorkách za jejich číselným označením. Na prvním místě je chemická značka hliníku a mezera, za níž následují chemické značky legujících prvků a číslice charakterizující jejich obsah v hmotnostních procentech.

Příklady: EN AW 1050 [Al 99,5]

EN AW 6063 [Al Mg0,7Si]

1.1.3 Značení stavů hliníku a jeho slitin

Tepelné zpracování se používá k homogenizaci legujících prvků, snížení napětí, zlepšení rozměrové stability, obrobiteľnosti a zlepšení mechanických vlastností.

Tabulka 2. Označení vybraných stavů slitin a podskupin tepelného zpracování

Označení stavu	Význam
F	Stav tvářený z výroby, kdy se nespécifikují mechanické vlastnosti
O	Stav žíhaný (měkký) s nízkou mezí pevnosti
H	Stav deformačně zpevněný u výrobků tvářených za studena nebo po tváření za tepla. Za písmenem následují vždy nejméně dvě číslice, z nichž první označuje způsob zpracování a druhá stupeň deformačního zpevnění
W	Nestabilní stav po rozpouštěcím žíhání u slitin, které stárnou při normální teplotě (přirozené stárnutí)
T	Stav tepelně-mechanicky zpracovaný, zpravidla precipitačně vytvrzený

Označení stavu je od označení druhu materiálu odděleno spojovací čárkou.

Příklad: EN AW 1050-H14 (Al deformačně zpevněný - 1/2 tvrdý) [4]

1.2 Rozdělení slitin hliníku

Hliníkové třídy mají široké spektrum vlastností v závislosti na legujících prvcích a tepelné úpravě. Tyto vlastnosti zahrnují dobrý vzhled, snadnou výrobu, odolnost proti korozi, vysokou pevnost ve srovnání s hmotností, dobrou svařitelnost a vysokou lomovou houževnatost. Správný výběr kvalitního hliníkového materiálu je závislý na konkrétní aplikaci a pracovních podmínkách. Vzhledem k rozdílnému složení hliníkových slitin se liší i jejich hustota a pevnost.

1.2.1 Třídy hliníku série 1XXX

Tyto třídy hliníku (1050, 1060, 1100, 1145, 1200, 1230, 1350, atd.) jsou charakterizovány vynikající odolností proti korozi, vysokou tepelnou a chemickou vodivostí. Mají horší mechanické vlastnosti, ale naopak se vyznačují vynikající zpracovatelností. Mírný nárůst pevnosti může být dosažen deformačním zpevněním. [5], [6]

1.2.2 Třídy hliníku série 2XXX

Tyto hliníkové slitiny vyžadují specifické tepelné zpracování pro dosažení optimálních vlastností. Po zušlechtní mají mechanické vlastnosti podobné, někdy dokonce vyšší než u nízkouhlíkové oceli. V některých případech se používá srážení tepelného zpracování (stárnutí) k dalšímu zvýšení mechanických vlastností. To zvyšuje mez kluzu, s tím spojené jsou ztráty v prodloužení, ale vliv na pevnost v tahu není tak výrazný.

Slitiny hliníku řady 2XXX nemají tak vysokou odolnost vůči korozi jako většina ostatních hliníkových slitin a podléhají riziku mezikrystalové koroze za určitých podmínek. Jsou vhodné pro aplikace vyžadující dobrou pevnost při teplotách do 150 °C. Slitina hliníku třídy 2024 je nejoblíbenější a často používaná v leteckém průmyslu.

1.2.3 Třídy hliníku série 3XXX

Slitiny hliníku třídy 3XXX jsou většinou tepelně nezpracovatelné, ale oproti slitině hliníku série 1XXX mají o 20 % vyšší pevnost. Protože je možné přidat do hliníku pouze omezené množství manganu (až do přibližně 1,5 %), tak se mangan jako hlavní prvek používá pouze v několika slitinách.

1.2.4 Třídy hliníku série 4XXX

Křemík je hlavním legujícím prvkem této třídy (4032, 4043, 4145, 4643 atd.), který může být přidán v dostatečném množství a způsobuje významné snížení teploty tavení. Proto se hliníko-křemíkové slitiny využívají především pro výrobu svařovacích drátů a jako materiál pro tvrdé pájky, které slouží k spojování hliníku. Tyto slitiny mají nižší teplotu tavení než čistý hliník. Slitiny obsahující vyšší podíl křemíku jsou obvykle tmavě šedé až černé barvy.

1.2.5 Třídy hliníku série 5XXX

Hořčík je hlavním legujícím prvkem, který poskytuje střední až vysokou pevnost vytvrditelným slitinám. Hořčík je mnohem účinnější než mangan jako tvrdidlo – ekvivalentní množství hořčíku 0,8 % odpovídá 1,25 % manganu a lze ho přidávat v značně větším množství. Hliníkové slitiny v této řadě (5005, 5052, 5083, 5086 atd.) vykazují dobré vlastnosti svařování a relativně dobrou odolnost proti korozi v mořské vodě.

1.2.6 Třídy hliníku série 6XXX

Hliníkové slitiny této série obsahují křemík a hořčík v takovém poměru, který je potřebný pro vytvoření silicidu hořčíku (Mg_2Si), což umožňuje jejich tepelné zpracování. I když nejsou tak pevné jako slitiny 2XXX a 7XXX, tak mají výbornou tvarovatelnost, svařitelnost, obrobitelnost, relativně dobrou odolnost proti korozi a střední pevnost. Hliníkové stupně v této skupině s ohledem na tepelné zušlechťování mohou být vytvořeny v podobě T4 (tepelně ošetřené, ale ne srážkově tvrdé) a poté zpevněny pro dosažení vlastností T6.

1.2.7 Třídy hliníku série 7XXX

Zinek představuje hlavní legující prvek v této sérii a je přítomen v množství od 1 do 8 %. Kombinace zinku s menším množstvím hořčíku ve zkujněných slitinách poskytuje středně až velmi vysokou pevnost. V malých množstvích se dále do těchto slitin přidávají prvky jako měď a chrom. Slitiny série 7XXX jsou často využívány pro stavbu trupů letadel, mobilních zařízení a jiných součástí, které jsou vystaveny vysokým zatížením. Vyšší pevnost hliníkových slitin však znamená nižší odolnost vůči korozi a jsou proto často používány v mírně přestárlém stavu, aby poskytly lepší kombinaci pevnosti, odolnosti proti korozi a lomové houževnatosti.

1.2.8 Třídy hliníku série 8XXX

Série 8XXX je speciálně navržena pro přidání legovacích prvků odlišných od těch, které se obvykle používají v sériích 2XXX až 7XXX. Přídavky železa a niklu jsou využívány k zvýšení pevnosti bez výrazné redukce elektrické vodivosti, což je velmi užitečné při výrobě vodivých slitin, například 8017. Hliníková slitina s obsahem lithia, jako například 8090, která má extrémně vysokou pevnost a tuhost, byla speciálně vyvinuta pro použití v leteckém průmyslu. [5]

1.2.9 Třídy hliníku série 9XXX

Momentálně neobsazená řada, která čeká na budoucí využití.

2 TVÁŘENÍ

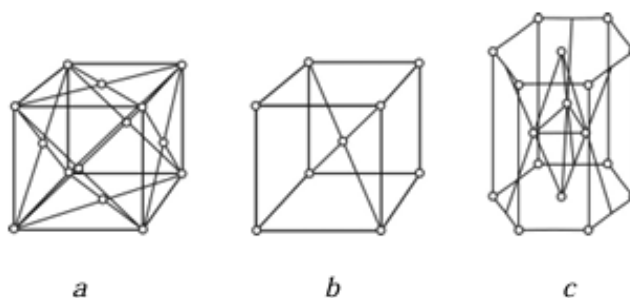
Tváření je proces mechanického zpracování kovů, při kterém dochází ke změně tvaru působením vnějších sil, aniž by došlo k poškození materiálu. Dochází tedy k trvalé plastické deformaci bez porušení soudržnosti. Výsledkem tváření není pouze trvalá změna tvaru materiálu, ale také změna jeho mechanických, chemických, fyzikálních a strukturních vlastností. [7], [8], [9]

Výhodami procesu tváření jsou zvýšená produktivita práce, efektivní využití materiálu a vynikající přesnost rozměrů výrobků. Naopak nevýhodou může být vysoká pořizovací cena strojů a nástrojů, stejně jako omezené možnosti rozměrů výsledného výrobku. [8]

Mezi další podmínky ovlivňující tvářitelnost patří teplota, rychlost deformace, velikost deformace, stav napjatosti, chemické složení a fyzikální stav materiálu. Tváření může být rozděleno dle teploty na tváření za studena a na tváření za tepla. Nebo dle změny tvaru na tváření plošné a na tváření objemové. [10]

2.1 Mechanismus plastické deformace kovů

Kovy mají krystalickou strukturu, která je tvořena mnoha krystaly různých tvarů a velikostí, nazývaných zrna. Ta jsou spojena silami meziatomových vazeb do jednoho celku, který tvoří uspořádanou mřížku.



Obrázek 4. Typy mřížek některých kovů a) krychlová plošně středěná mřížka, b) krychlová prostorově středěná mřížka, c) šesterečná (hexagonální) mřížka [11]

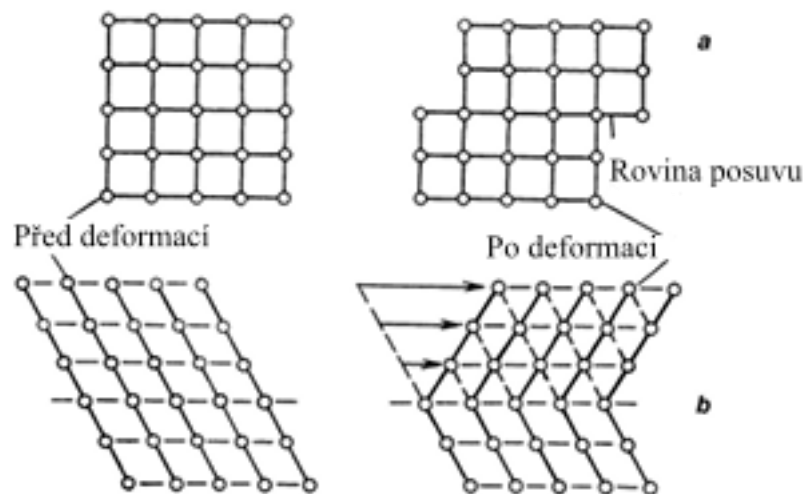
Specifická orientace krystalografických os ovlivňuje anizotropii fyzikálních vlastností krystalů. Působením tangenciálních napětí se může v mřížce objevit smyková deformace. Pokud posun atomů přesáhne polovinu meziatomové vzdálenosti, dojde k nevratnému přechodu atomů do nové stabilní polohy a plastické deformaci kovu nazývané skluz. [11]

Posun představuje smyk jedné části krystalu vůči druhé v některých rovinách. Skluz probíhá v mnoha rovnoběžných rovinách najednou a počet těchto rovin se zvyšuje s rostoucí

deformační silou. To vede k vytváření kluzných pásů, které mají určité krystalografické směry. Kluzné roviny obsahují největší hustotu atomů a klouzání se odehrává podél směrů s minimální vzdáleností mezi atomy. Počet rovin a směrů klouzání je závislý na typu krystalové struktury.

V případě narušení krystalové mřížky se klouzání usnadňuje díky postupnému smyku atomů v rovině klouzání. Pro posun dislokací je potřeba menší napětí než pro současný skluz atomů po celé rovině. Během plastické deformace dochází k deformaci kluzných rovin, což ztěžuje deformaci podél těchto směrů a vytváří nové směry kluzu. Deformace končí, když jsou využity všechny možné směry.

Dalším způsobem plastické deformace je dvojčatění, kdy dochází k posunu části krystalu tak, že vznikne zrcadlový obraz jedné části krystalu ve vztahu k druhé části. Tento jev je častější při nižších teplotách a také při náhlých zatíženích. [11]

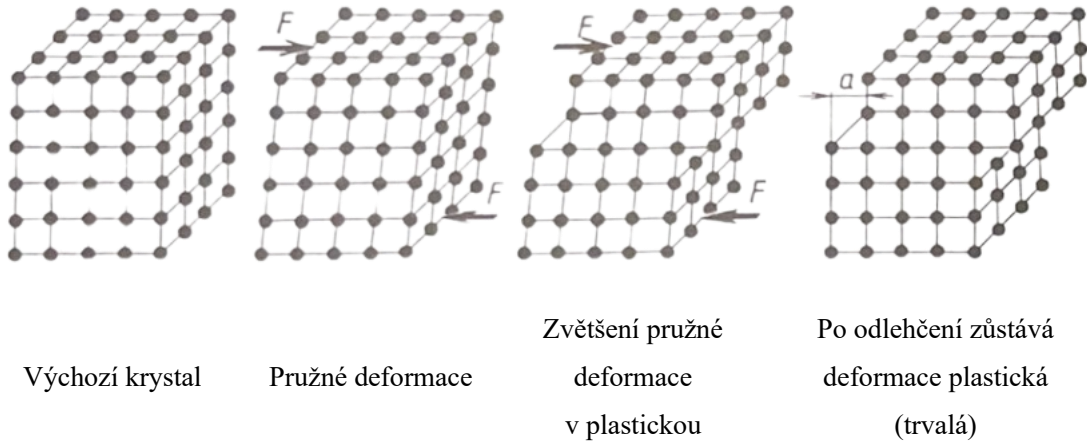


Obrázek 5. Mechanismy plastické deformace: a) sklouznutí, b) dvojčatění [11]

Při tváření kovů předchází vždy plastické deformaci deformace elastická. Plastická deformace je ve své podstatě pohyb jednotlivých částí kovů vůči sobě, aniž by mezi nimi přestala působit koheze. Tato vlastnost kovů umožňuje jejich zpracování tváření. Mechanismus vzniku plastické deformace je možné vysvětlit na základě pohybu a vzniku mřížkových poruch. Stavba krystalové mřížky není v reálných kovech dokonalá. [9], [10]

Při působení vnějších sil na kovový monokrystal dochází k deformacím jeho mřížky, což může způsobit zvětšení nebo zmenšení parametru mřížky a . Jestliže atomy změny svou polohu v rozsahu menším než jeden parametr, jedná se o pružnou deformaci. Jakmile přestanou vnější síly působit, dojde vlivem vnitřní energie k vyrovnání všech změn a atomy

se vrátí zpět do původní polohy. Pokud ale napětí vzroste na určitou hodnotu (mez kluzu), dojde k trvalé změně, při které atomy mění svoji vzájemnou polohu nejméně o jeden parametr a . Dochází tak k trvalé (plastické) deformaci. [10]



Obrázek 6. Schéma pružné a trvalé deformace [10]

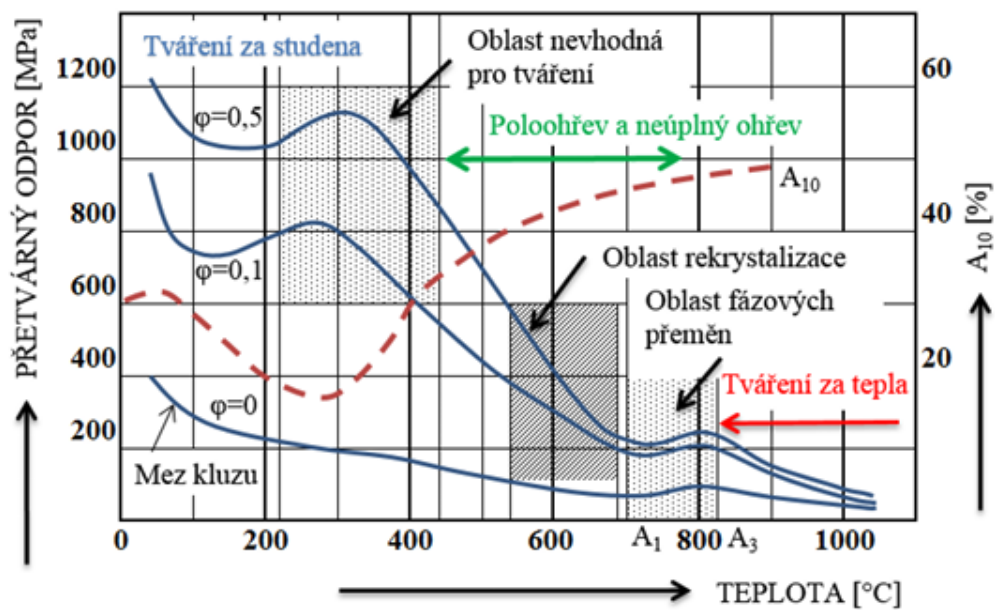
2.2 Rozdělení tváření

Podle tvářecí teploty lze rozdělit technologii tváření na:

- tváření za studena,
- tváření za tepla,
- tváření za poloohřevu.

Teploty se určují podle výše rekryalizační teploty. Dále se technologie tváření dělí podle stavu napjatosti a podle směru napětí, které vzniká při plastické deformaci na:

- objemové tváření,
- plošné tváření. [7], [9]

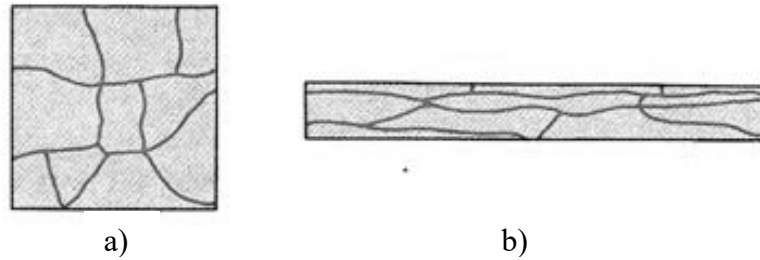


Obrázek 7. Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [12]

2.2.1 Tvářeni za studena

Během tvářeni za studena dochází k trvalé a nevratné změně tvaru materiálu bez třískového odebrání, což je způsobeno vnějšími silami. Tento proces probíhá při teplotě pod bodem rekystalizace materiálu. Během deformace za studena se mechanické vlastnosti, jako je mez kluzu a pevnost v tahu, zvýší v důsledku akumulace plastické deformace v materiálu. Při tvářením za studena dochází k zpevnění kovu. Zvyšuje se pevnost a tvrdost, ale snižuje se houževnatost. Zpracování není v celém průřezu materiálu rovnoměrné, což může vést k vzniku nebezpečných pnutí, jež mohou materiál poškodit. Základními technologiemi tvářeni za studena jsou stříhání, prostřihování, ohýbání a tažení. [7], [13], [14]

Při tvářeni za studena dochází k nepravidelné deformaci kovu v důsledku různých směrů kluzných rovin, což způsobuje zpevnění materiálu. Během tohoto procesu se zrna materiálu prodlužují ve směru největšího přemístování kovu a vytváří se tzv. textura. Když se takový materiál zahřeje na určitou teplotu, atomy se snaží dosáhnout rovnováhy. Deformace mřížky se vyrovná, což vede ke snížení vnitřního napětí, ale rozměry a tvar deformovaných zrn zůstávají neměnné (žádná změna ve struktuře materiálu). [10]



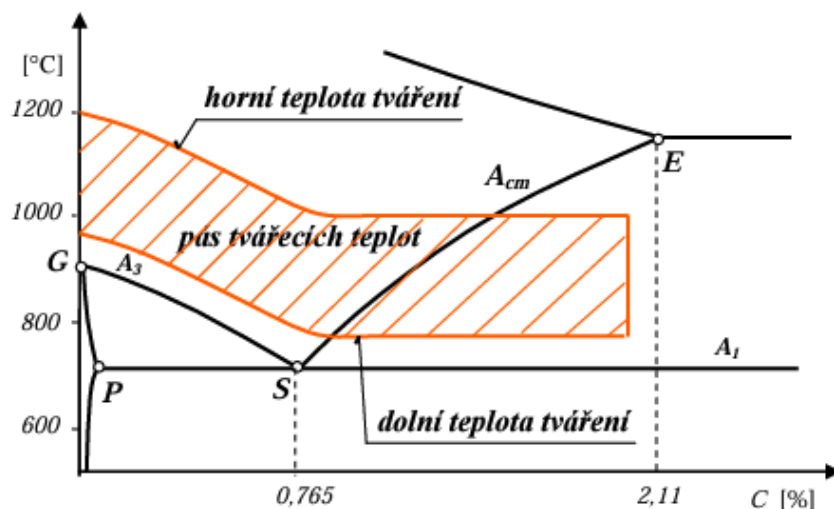
Obrázek 8. Změna tvaru zrn tvářením a) zrna před tvářením, b) zrna po tvářením [15]

2.2.2 Tvářením za tepla

Při tvářením za tepla se pevnost materiálu snižuje vlivem ohřevu, což zlepšuje jeho tvárnost. Tento proces je poměrně zdlouhavý a nákladný jak ekonomicky, tak i ekologicky. Tvářením probíhá nad teplotou rekrystalizace. S každým ohřevem se na povrchu ohřívaného materiálu tvoří oxidy. Tyto oxidované částice se při tvářením odlupují ve formě šupin, které se nazývají okuje. Tím dochází ke ztrátám materiálu, které při jednom ohřevu činí asi 3 % hmotnosti polotovaru.

Během procesu dochází k rekrystalizaci, která způsobuje neustálý vznik a růst nových zrn. Tato neustálá tvorba nových zrn udržuje tvárnost materiálů a umožňuje velkou deformaci bez lomu. Kontrola konečných rozměrů deformovaných dílů je při obrábění za tepla náročnější kvůli tvorbě okujů a objemovým změnám během následného ochlazování obrobku.

Základními technologiemi používanými při tvářením za tepla jsou volné kování, zápusťkové kování, tažení profilů, protlačování a tažení. [7], [14], [15]



Obrázek 9. Oblast tvářecí teploty [16]

2.2.3 Tváření za poloohřevu

Při tváření za poloohřevu se používají teploty, které leží mezi teplotním rozsahem tváření za studena a za tepla. Průmysloví uživatelé kombinují výhody obou metod a volbou konkrétní teploty tváření se snaží vyhnout nevýhodám obou technologií. Při tváření za poloohřevu je potřebná deformační síla nižší než při tváření za studena, ačkoli konečná povrchová úprava a rozměrová přesnost nejsou tak dobré jako při tváření za studena, ale lepší než při tváření za tepla.

Ve srovnání s tvářením za studena snižuje tváření za poloohřevu napětí při toku materiálu, což usnadňuje jeho opracování a snižuje spotřebu energie. Zvyšuje také tvárnost, což umožňuje vytvářet středně složité geometrie. Kvalita povrchu a rozměrová přesnost dílů jsou lepší než u dílů vyráběných tvářením za tepla. Protože nedochází k rekrystalizaci, může silná deformace při tváření za tepla vést ke zjemnění zrn. [14]

2.3 Objemové tváření

Při objemovém tváření dochází k deformaci ve všech třech osách souřadného systému. Tato technologie je často kombinována s tvářením za tepla, kdy se materiál nejprve ohřeje na tvářecí teplotu, což zlepšuje jeho tvárnost. Objemové tváření může zahrnovat různé techniky, jako je kování, válcování, protlačování a tažení.

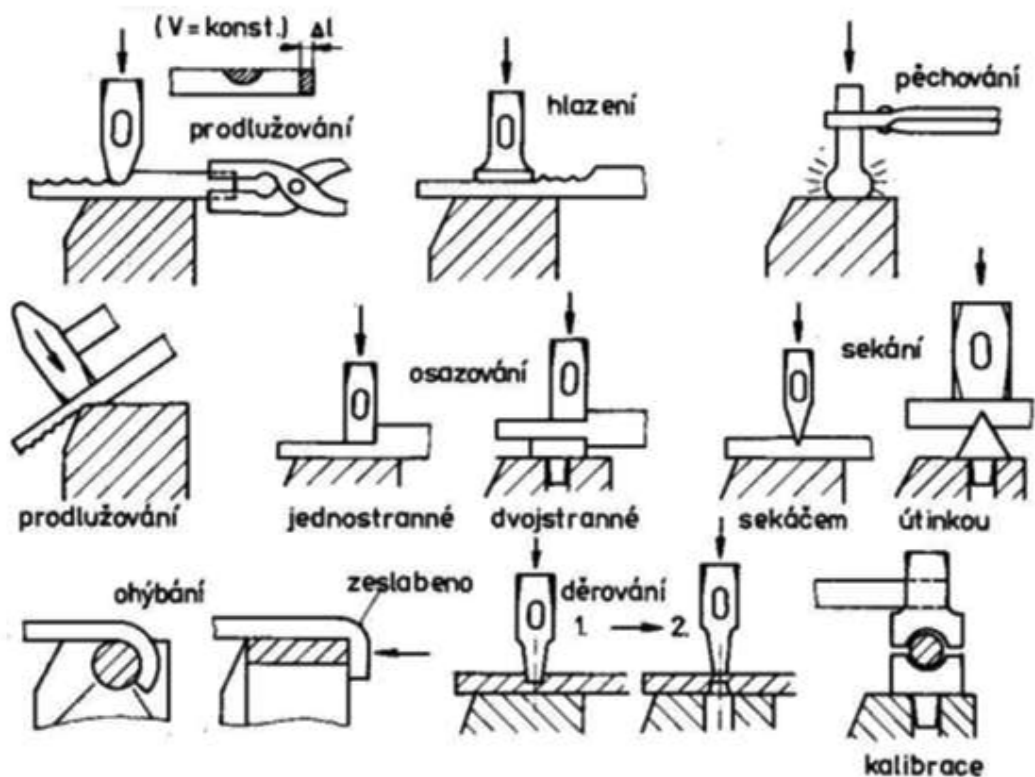
2.3.1 Kování

Kování je způsob zpracování kovových materiálů za tepla (výjimečně za studena), při kterém se na tvářený materiál postupně působí rázem nebo tlakem. Z technologického hlediska se rozeznává kování volné a zápustkové.

- **Volné kování**

Je to tvářecí proces, který se skládá z mnoha samostatných rozdílných operací. Při volném kování je materiál tvářen mezi plochými nebo tvarovými kovádky, která jsou upevňovaná na buchar nebo lis pomocí rybiny a klínu. Jejich úkolem je ovlivňovat změny tvarů a rozměrů, aby materiál tvářený údery nebo tlakem tekl volně především ve směru kolmém k působení síly. Volné kování je náročné a zdlouhavé, výkovky mají nerovný povrch pokrytý silnou vrstvou okují, proto jsou zapotřebí velké přídavky na další opracování. Proto se volné kování uplatňuje při kusové a malosériové výrobě.

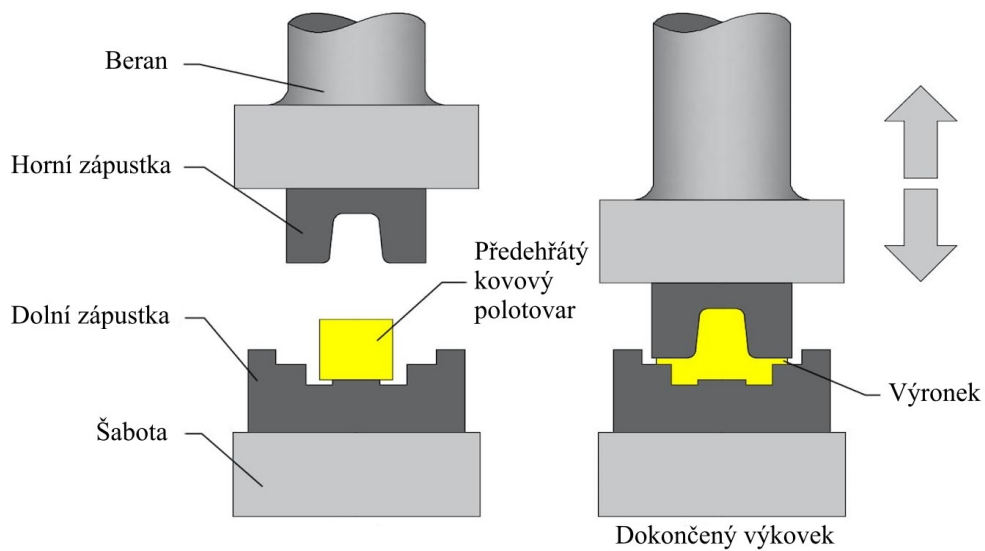
Ruční volné kování se stále používá při výrobě drobných součástí, avšak v průmyslové praxi se provádí pouze strojně. [8]



Obrázek 10. Základní operace při ručním kování [16]

- **Zápustkové kování**

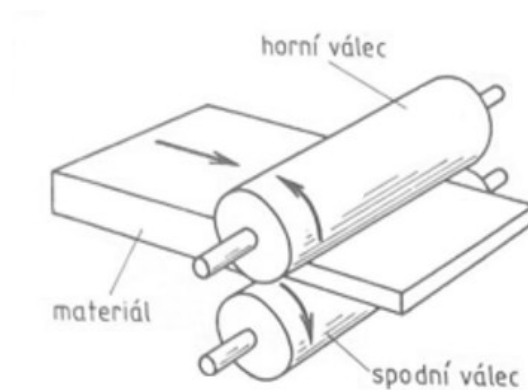
Jde o proces tváření materiálu v dutinách nástroje nazývaných zápustky a to až do výsledného výrobku – výkovku. Zápustka je většinou dvoudílný nástroj. Jen málokdy je tvar zápustky tak jednoduchý, aby se dal vykovat z výchozího polotovaru přímo v jediné zápustkové dutině. Zápustky mají v dělicí rovině výronkovou drážku, kde se shromažďuje přebytečný materiál. Výronek je oddělen od výkovku tzv. můstkem, který reguluje tlak v dutině zápustky. Jednoduché tvary se kovají pouze při jednom ohřevu, složitější se musí ohřívat vícekrát a používat předkovací dutiny. Přesnost a jakost povrchu výkovků je podstatně lepší než u volného kování. V některých případech není nutné další zpracování (provádí se pouze úprava funkčních ploch). Směr vláken materiálu kopíruje obrys výkovku. [7], [8]



Obrázek 11. Zápustkové kování [17]

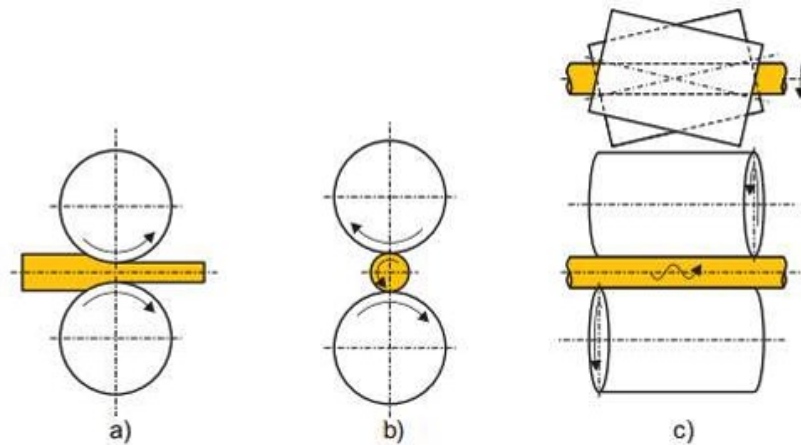
2.3.2 Válcování

Válcování je způsob tváření kovového materiálu, při němž deformace probíhá postupně, a to jen v relativně malé části tvářeného materiálu uzavřeného válcovací mezerou mezi dvěma proti sobě se otáčejícími válci. Materiál se válcováním prodlužuje a zároveň stlačuje (zmenšuje se průřez). Válcování se využívá jak za tepla, tak i za studena.



Obrázek 12. Princip válcování [7]

Při válcování se válec deformuje pružně, kdežto tvářený materiál plasticky. Válce válcovacích stolic jsou buď hladké, rýhované nebo kalibrované. Podle směru toku materiálu, uložení os nebo vzniklým deformacím se rozlišuje válcování podélné, příčné a kosé. [7], [8]

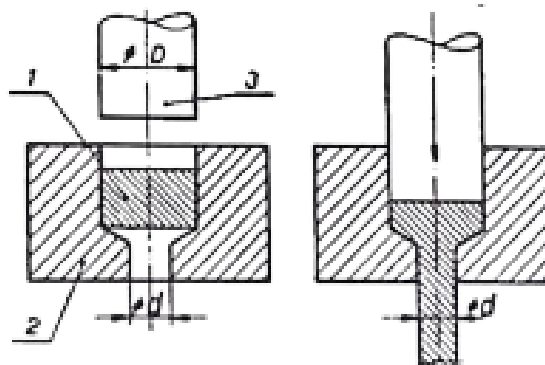


Obrázek 13. a) podélné, b) příčné, c) kosé válcování [10]

2.3.3 Protlačování

Protlačování je metoda zpracování kovových materiálů, která může být provedena buď za studena, nebo za tepla. Materiál je vytlačován průtlačníkem z uzavřeného prostoru průtlačnice, který funguje jako píst, do matrice pod tlakem. Tímto způsobem lze vytvářet jak plné profilové tyče jednoduchých nebo složitých tvarů podle profilu matrice, tak i duté profilové tyče.

Při deformaci materiálu se rozlišuje tři typy protlačování – dopředné, zpětné a příčné. Tyto metody mohou být spojeny do jedné sdružené průtlačnice, kde konečný tvar výlisku vzniká průchodem jak pevné, tak pohyblivé průtlačnice. [8]



Obrázek 14. Dopředné protlačování plného kruhového profilu 1 - materiál, 2 - průtlačnice, 3 - průtlačník pohyblivé průtlačnice [8]

2.3.4 Tažení

Tažení je proces, při kterém se polotovar protahuje otvorem průvlaku, čímž dochází k zmenšení průřezu a zvětšení délky. Tím se dosahují přesných rozměrů a tvarů, zlepšuje se kvalita povrchu a mechanické vlastnosti. Nástroj zde zůstává nepohyblivý. Klíčovou podmínkou pro tažení je snížení vnitřního napětí pomocí použití maziva. Mazivo by mělo snižovat tření, oddělovat polotovar od průvlaku, odvádět teplo a zajistit hladký povrch

Tažení se využívá pro výrobu drátů, tyčí a tvarů s nepravidelnými průřezy. Táhnout se dají jak plná, tak dutá tělesa. Dráty mohou být taženy za sucha nebo za mokra s povrchovou úpravou (např. pozinkování, pocínování atd.) nebo bez ní. [10]

2.4 Plošné tváření

Plošné tváření je technologický proces, při kterém se tlakem deformuje plechový nebo deskový materiál do požadovaného tvaru. Oproti objemovému tváření nedochází k deformaci ve všech třech osách souřadného systému. Deformace ve třetím směru je oproti nim zanedbatelná. Tento proces se obvykle provádí za studena nebo za tepla na lisovacích strojích.

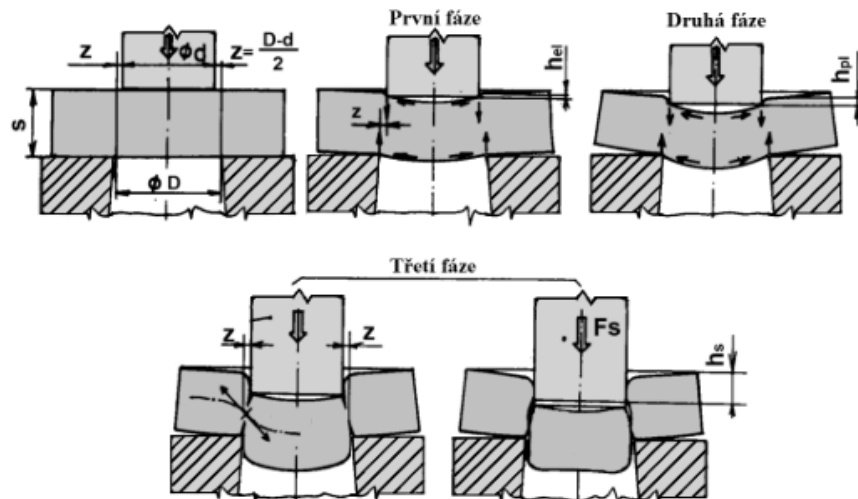
Plošné tváření se používá při výrobě například plechových dílů pro automobilový průmysl, elektroniku nebo domácí spotřebiče. Jde o efektivní metodu formování materiálu, která umožňuje vytvoření složitých geometrických tvarů s vysokou přesností. [8]

Rozdělení procesů plošného tváření podle ČSN 22 6001:

- **stříhání** (prosté stříhání, děrování, vystřihování, ostřihování, přistřihování, nastřihování, prostřihování, protrhávání, vysekávání),
- **ohýbání** (prosté ohýbání, ohraňování, rovnání, zakružování, lemování, obrubování, osazování – prosazování, drápkování, zkrucování),
- **tažení** (prosté tažení, tažení se ztenčením stěny, zpětné tažení, žlábkování, protahování, rozšiřování, zužování, přetahování, objemové tažení),
- **tlačení** (tlačení tvaru, rotační obrubování, rotační lemování, rotační rozšiřování, rotační zužování, rotační žlábkování, rotační drápkování, osazování – prosazování, tlačení se ztenčením stěny). [9]

2.4.1 Stříhání

Stříhání spočívá v oddělování materiálu protilehlými břity nožů. Přesnost a kvalita střížné plochy je ovlivněna různými faktory, mezi které patří velikost střížné mezery (vůle), vlastnosti materiálu, způsob stříhání, kvalita střížného nástroje nebo lisu. Úpravami střížného nástroje a volbou způsobu stříhání lze ovlivnit průběh operace tak, aby se předešlo vzniku nekvalitní střížné plochy s širokým pásmem utržení a deformací výstřížku. [2]



Obrázek 15. Průběh stříhání s normální střížnou vůlí [12]

Stříhání probíhá prakticky ve třech fázích. V první fázi je oblast pružných deformací. Materiál se pružně stlačuje a ohýbá, přitom se lehce vtlačuje do otvoru ve střížnici, přičemž napětí v kovu nepřesahuje mez kluzu.

Druhá fáze je oblast plastických deformací. Střížník se vtlačuje do plechu a ten do otvoru ve střížnici. Vlákná kovu se ohýbají a prodlužují. Na konci této fáze dosahují napětí blízko ostří mez pevnosti ve smyku.

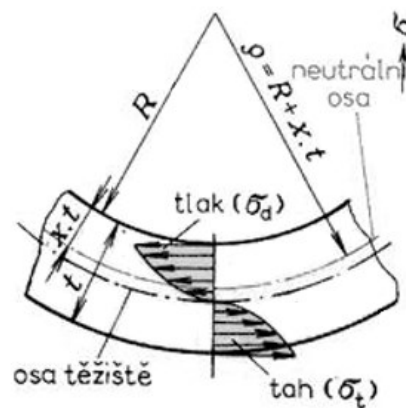
Třetí fáze je smyková. Začínají vznikat mikroskopické a následně makroskopické trhlinky, které se tvoří při ostří střížníku a střížnice. Tyto smykové trhliny se rychle šíří až k přestřížení materiálu. [9]

Stříhání lze dále rozdělit podle konstrukce nožů (střížníků) na:

- stříhání rovnoběžnými noži,
- stříhání šikmými noži,
- stříhání kotoučovými noži,
- stříhání noži na profily, tyče a trubky.

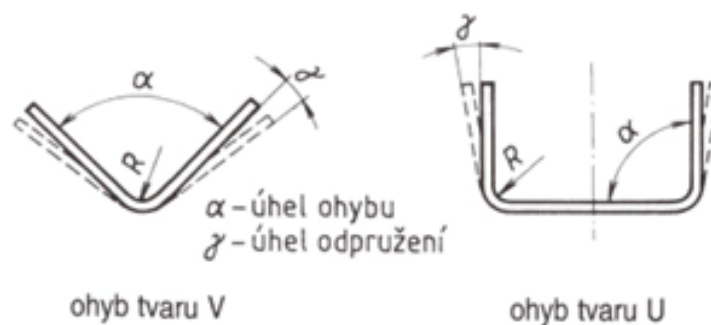
2.4.2 Ohýbání

Ohýbání je trvalé deformování materiálu způsobené napětím vytvořeným působící silou, které materiál buď ohýbá nebo rovná. Ohýbání je velmi používaná technologická operace ve strojírenské výrobě. Požadovaný tvar se získá u většiny součástí z plechů, drátů a tyčí i několika ohyby. Ve většině případech se ohýbá za studena pomocí nástrojů a strojů k ohýbání. Tvrdé a křehké materiály se ohýbají za tepla. Ohýbadlo se skládá z ohybníku a ohybnice. Tvary vytvořené touto technologií jsou nevratné, protože překračují mez kluzu a dochází k plastické deformaci, která je doprovázena elastickou deformací. Po průřezu se vyskytuje pružná plastická deformace s různým průběhem od povrchu materiálu směrem k neutrální ose.



Obrázek 16. Průběh napětí a posunutí neutrální osy [10]

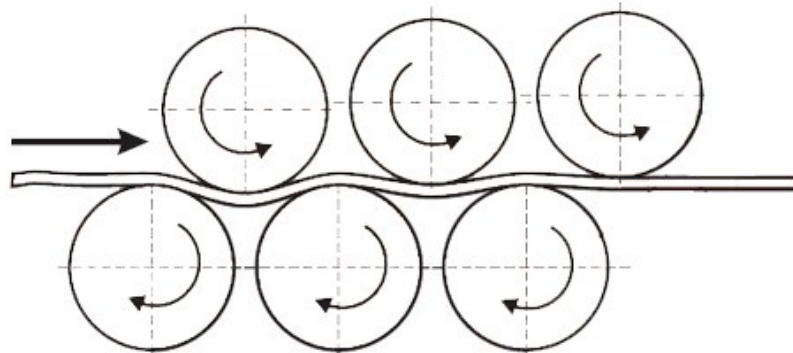
Pokud vnější síly přestanou působit na deformované těleso, rozměry výrobku se částečně vrátí do původnímu stavu, což se nazývá odpružení. Největší význam má odpružení při ohýbání za studena, kdy se projevuje jako úhlová odchylka. Zpětné odpružení je způsobeno pružnou deformací materiálu kolem neutrální osy. [2], [9], [18]



Obrázek 17. Odpružení materiálu po ohybu [15]

2.4.3 Rovnání

Rovnání je technologický proces, který se používá k odstranění nežádoucích deformací (např. vnitřního napětí) způsobených manipulací nebo při výrobě. Tato technologie využívá princip ohýbání a provádí se mezi rovnacími válci při rovnání plechů, rovnacími tvarovými kotouči při rovnání drátů nebo v jednoduchých nástrojích na lise. Materiál se nahřívá v úzkém pruhu a pouze delší vlákna, která se tímto napěchují, zůstávají po zchladnutí zkrácená. [2], [9]



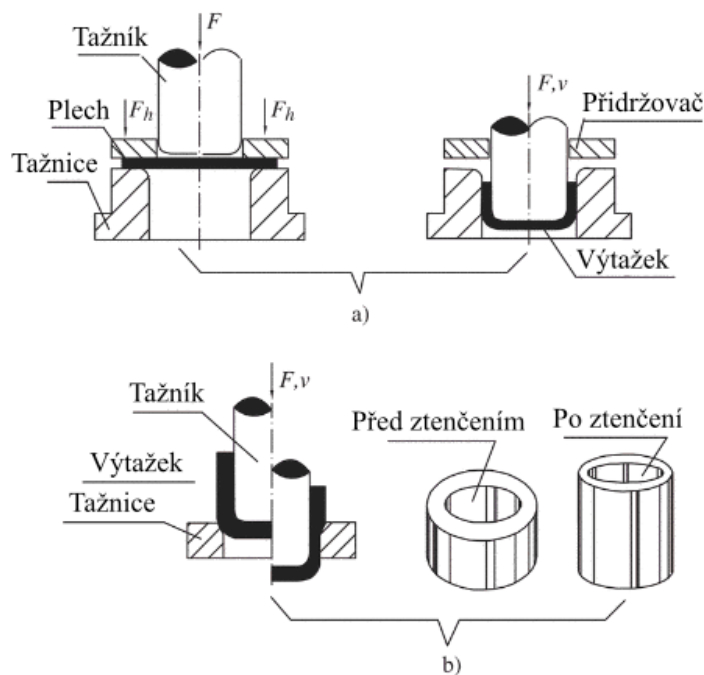
Obrázek 18. Rovnání plechu válcováním [19]

3 TECHNOLOGIE HLUBOKÉHO TAŽENÍ

Hluboké tažení je oblíbené kvůli rychlým časům lisovacích cyklů a schopnosti vytvářet složité osově symetrické geometrie s několika málo operacemi a za použití relativně nízké pracovní síly. Tento proces tváření kovů umožňuje vyrábět vysoce pevné a lehké díly a také geometrie, které nemusí být dosažitelné jinými výrobními metodami. [19]

Donedávna bylo tváření plechů založeno především na zkušenostech a metodách pokus-omyl. V posledních dvou desetiletích však počítačová analýza konečných prvků umožnila kvantitativní návrh procesů tváření plechů a zápustek. To umožnilo průmyslu tváření plechů vyrábět sofistikované výrobky podle přísných norem za použití nově vyvinutých, obtížně tvarovatelných slitin, jak je vidět v leteckých a automobilových aplikacích. [18]

Tažení je plošné tváření, při kterém se jedním anebo v několika tazích vyrobí z rovného plechu (přístřihu) duté těleso. Nástrojem je tažidlo, které se skládá z tažníku a z tažnice. V zásadě lze proces tažení rozdělit na tažení bez zeslabení stěny a se zeslabením stěny výtažku. [2], [8]

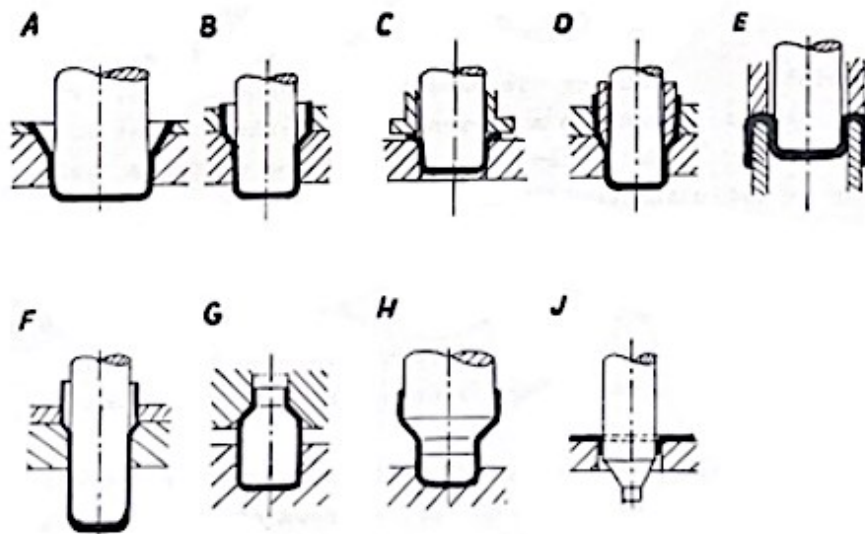


Obrázek 19. Schematické znázornění procesu hlubokého tažení

a) tažení bez ztenčení stěny b) tažení se ztenčením stěny [19]

- **Rozdělení technologie tažení**

Technologii tažení je možno rozdělit podle několika aspektů, především podle použitého nástroje nebo podle tvaru, kterého chceme docílit. Tažením lze vyrábět kromě rotačních tvarů také nerotační a nesymetrické tvary. Se složitostí a členitostí výtažku stoupá také náročnost výroby.

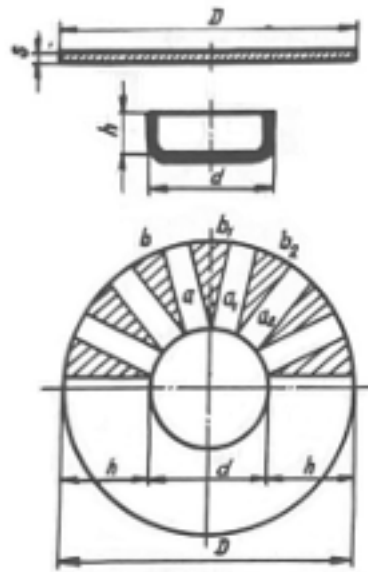


Obrázek 20. Schémata tažných operací

A, B – tažení bez přidržovače 1. a 2. tah, C, D – tažení s přidržovačem 1. a 2. tah, E – zpětné tažení, F – tažení se ztenčením stěny, G – zužování, H – rozšiřování, J – lemování
[9]

3.1 Proces tažení

Proces tažení lze jednoduše popsat na příkladu tažení válcové nádoby. Při tažení se prstencová část přístříhu mění na válec o průměru d a výšce h . Kvůli zákonu o stálosti objemu platí, že výška h je větší než $(D-d)/2$. Během tažení je značná část materiálu deformována a je potřeba ji přemístit z vyšrafovaných trojúhelníků. Tento objem zvyšuje výšku nádoby a při velkých deformacích mohou vzniknout vlny a přeložení. Pro jejich prevenci je důležité použít přidržovač. [9]



Obrázek 21. Přemístění materiálu při tažení [9]

3.2 Vznik deformací a napjatosti

Hluboké tažení se řídí mnoha složitými faktory, které mohou vést k úspěšným nebo vadným výrobkům.

Vůle

Nesprávná vůle mezi tažníkem a tažnicí může mít za následek prasknutí pláště. Tento problém může být přímým důsledkem toho, že tažník a tažnice byly navrženy nebo vyrobeny s nesprávnou vůlí. Také mohou vznikat lomy, které vzniknout rozdílnou tloušťkou plechu (není rovnoměrný), nebo pokud tažník a tažnice nejsou správně vyrovnány.

Přítlak přidržovače

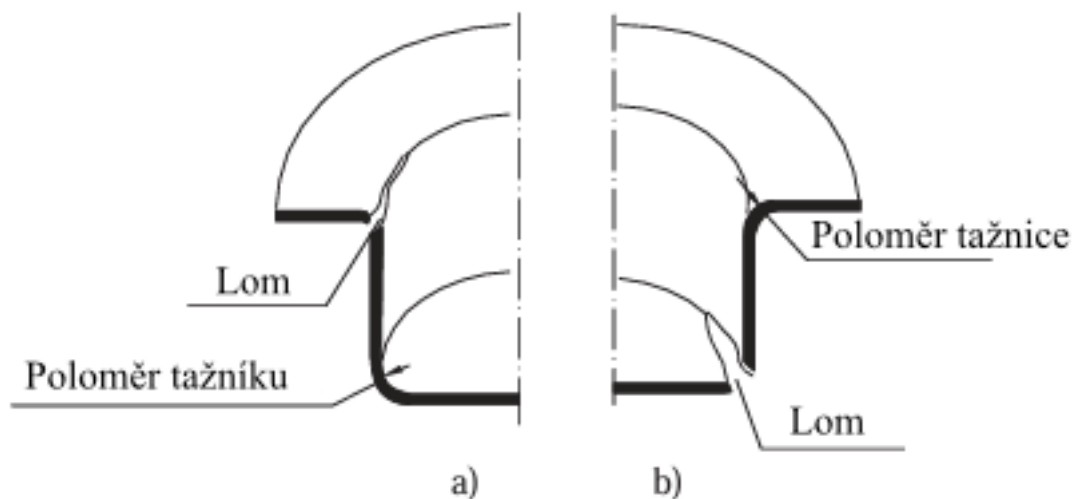
Pokud na polotovár působí příliš velká síla, zvýší se zatížení tažníku (kvůli zvýšení tření). Toto zvýšení povede ke vzniku trhlin na stěně pláště. Pokud přidržovač vyvíjí příliš malý tlak nebo pokud je poloměr tažníku příliš velký, objeví se na horním okraji dílu vlny, jak je znázorněno na obr. 22. [19]



Obrázek 22. Vznik vln na výtažku [19]

Poloměr rohu tažníku a poloměr tažnice

Tyto poloměry jsou důležité pro úspěšné hluboké tažení. Pokud jsou poloměry příliš malé, může dojít k lomu rohu v důsledku zvýšené síly potřebné k vytažení kalíšku. Škrábance, nečistoty nebo jakékoli povrchové vady tažníku nebo tažnice zvyšují potřebnou tažnou sílu a mohou způsobit roztržení pláště (obr. 23).

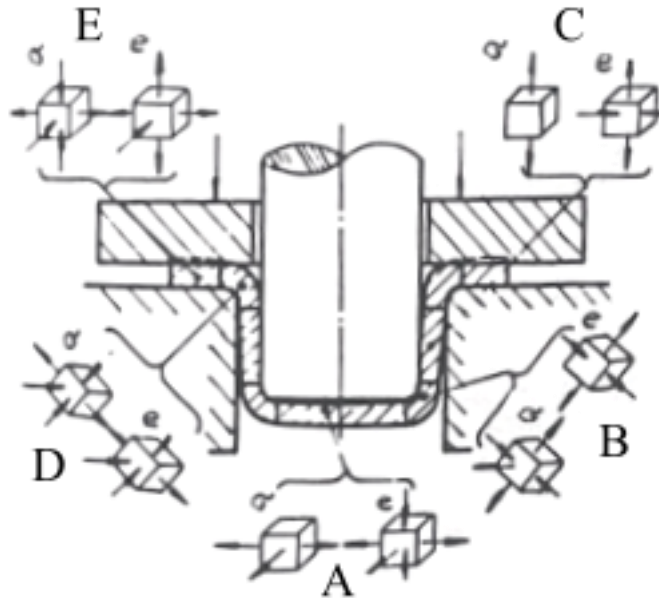


Obrázek 23. Vznik lomu při hlubokém tažení: a) způsobený příliš malým poloměrem tažnice, b) způsobený příliš malým poloměrem tažníku [19]

Při tažení je napjatost v jednotlivých místech jiná a dochází zde k anizotropii mechanických vlastností plechu.

Dno (A) je mírně a rovnoměrně vytahováno směrem do dvou směrů. Válcová část (C) je táhnuta pouze v jednom směru, zatímco u dna (B) dochází ke dvojosému nebo trojosému namáhání. Materiál, který prochází tažnou hranou (D), je zatěžován radiálním ohybem a tangenciálním tlakem. Materiál pod přidržovačem (E) je namáhán tahem v radiálním směru, tlakem v tangenciálním směru a tlakem kolmo na povrch příruby. Pokud nástroj nemá přidržovač, není zde tlak pod přidržovačem. Nejvíce nevýhodné podmínky nastávají u místa

ohybu na dně výtažku, kde se vyskytuje vysoké tahové napětí. To vede k oslabení tloušťky stěny a zvyšuje riziko utržení dna. [9]



Obrázek 24. Schéma napjatosti a deformací při hlubokém tažení s přidržovačem [9]

3.3 Prvky ovlivňující konečný tvar hlubokotažných výrobků

Faktory ovlivňující konečný tvar hlubokotažného výrobku jsou následující.

1. Vlastnosti materiálu polotovaru: Na průběh deformace hlubokotažného polotovaru mají vliv vlastnosti materiálu, jako je normálová anizotropie nebo poměr plastické deformace (r) a koeficient deformačního zpevnění (n). Plechový materiál se chová anizotropně, což znamená, že materiál vykazuje různé deformační chování v různých směrech. V materiálech s vysokou hodnotou n se napětí při proudění rychle zvyšuje s deformací. To má za následek rovnoměrné rozložení deformace v celém plechu, a to i v oblastech s nízkou deformací.
2. Rozměry nástroje: Nesprávná konstrukce nástrojů, jako je například tažník a tažnice, může vést ke vzniku výrobku s odchylným tvarem nebo k poruchám. Odchylný tvar je způsoben pružným zpětným rázem po tváření a zasouvání nástrojů.
3. Síla přidržovače (BHF): Přestože tloušťka plechu a poloměr zápustky poskytují určité omezení toku kovu do zápustky, je obvykle zapotřebí dalšího omezení, aby bylo možné tok kovu kontrolovat. Tohoto dodatečného omezení se dosáhne použitím přidržovače. BHF je také jedním z důležitých parametrů v procesu hlubokého tažení,

protože nedostatečný přítlak přidržovače způsobuje vznik vln na přírubě, které se mohou rozšířit i na stěnu kalichu. Příliš velký přítlak a tření mohou navíc způsobit ztenčení stěn a křehnutí. [20]

3.4 Technologické zásady

3.4.1 Mazání

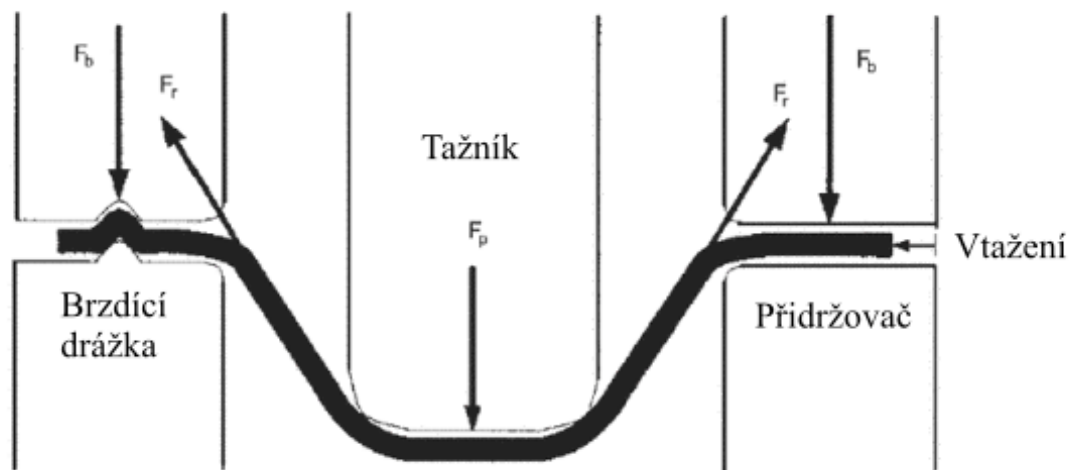
Maziva musí být pečlivě vybrána, aby bylo zajištěno správné mazání v průběhu celého procesu. Obvykle se používají maziva s vysokou viskozitou a přísadami proti opotřebení, aby odolala extrémním tlakům, které se vyskytují při hlubokém tažení. Kromě toho správné mazání také pomáhá předcházet zadírání a vrypům na povrchu kovu, což podporuje hladké a efektivní tváření kovu. Správné použití maziva během hlubokého tažení je velmi důležité pro snížení tření, zvýšení tažnosti, minimalizaci opotřebení nástroje a prevenci vad výrobku. Výběr maziva je ovlivněn složitostí operace, typem tažení a materiálem, který se zpracovává. [19], [21]

Během procesu hlubokého tažení se vyskytují různé typy mazacích podmínek, od hydrodynamického mazání v přidržovači až po mezní mazání na poloměru tažení, které často vede k rozpadu filmu.

Kromě toho, hliník a jeho slitiny mohou být provozovány za mírných podmínek s použitím určených maziv, zatímco pro náročné provozy se doporučuje použití sušeného mýdlového filmu nebo voskového filmu, minerálního oleje nebo mastného oleje, tukových emulzí v mýdlové vodě a jemně dělených plnidel. Použití vhodného maziva během procesu tváření zlepšuje kvalitu povrchu a snižuje tření na styčných plochách, což v konečném důsledku zvyšuje životnost zápustky snížením opotřebení. Maziva se suchým filmem mají při tváření hliníkových plechů výhody oproti běžným olejovým mazivům, protože nabízejí vysoký výkon při hlubokém tažení, zejména u složitých panelů automobilových karoserií. Snížené tření vede ke zvýšení tvářitelnosti a rovnoměrnějšímu rozložení tloušťky plechu. [19], [22]

3.4.2 Přidržovač a brzdící drážky

Přidržovače jsou nezbytnou součástí systému tváření kovů. Řídí množství kovu, které vtéká do dutiny tažnice tím, že před tvářením působí na obvod polotovaru omezující silou. Na obr. 25 je znázorněno schéma jednoduchého systému tváření plechu. Základními součástmi jsou tažník, tažnice a přidržovač, který může, ale nemusí obsahovat brzdící drážky. Tažník táhne polotovar a vytváří tvar, zatímco přidržovač řídí tok kovu do dutiny tažnice.



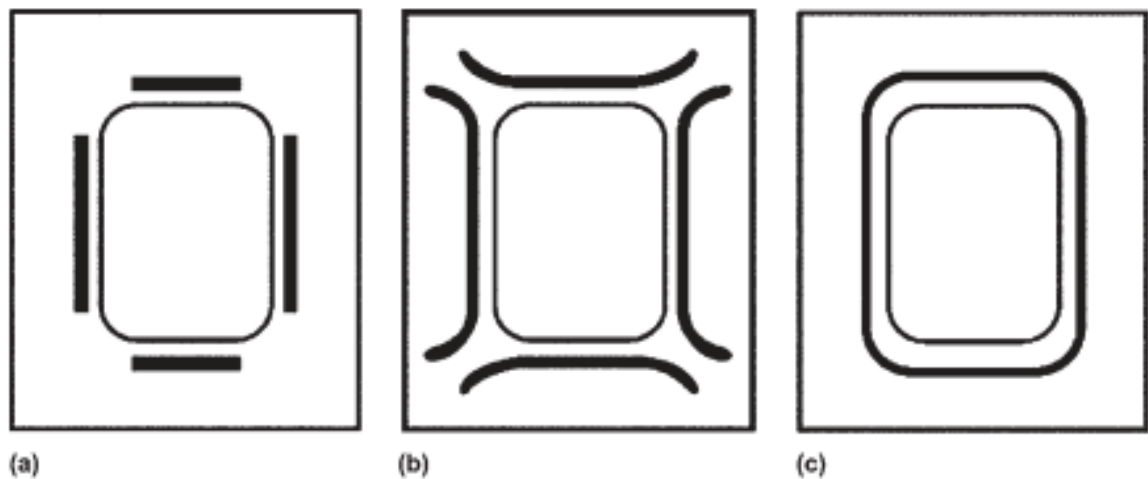
Obrázek 25. Schéma tažení plechu s přidržovačem a brzdící drážkou. F_b – síla přidržovače, F_p – síla tažníku, F_r – omezující síla [23]

Brzdící drážky řídí tok materiálu během tažení do dutiny tažníku kombinací třecích a ohybových sil. "Uzavírací drážky" zabraňují toku kovu do dutiny tažnice svým tvarem např. obdélníkové nebo kulaté. Tím se v plechu vytvoří napěťové podmínky srovnatelné s tvářením tahem.

Přidržovač, ať už s brzdnými drážkami nebo bez nich, je kritickou součástí lisovacího systému. Zatímco ploché přidržovače spoléhají výhradně na tření, které vytváří omezující síly na okraji polotovaru, brzdné drážky spoléhají na ohýbání plechu a v menší míře na tření, které reguluje množství materiálu polotovaru, který proudí do dutiny tažnice. Ohybová síla je nepřímo úměrná poloměru zakřivení, zatímco třecí síla je přímo úměrná koeficientu tření a silám působícím na přidržovače. Ploché přidržovače jsou citlivější na změny třecích podmínek, nesouosost tažníku a tažnice a na změny tloušťky polotovaru.

Působení brzdící drážky probíhá ve dvou fázích:

1. Uzavření: Výstupek brzdy zatlačí kov do odpovídající drážky na druhé straně a vytvoří tak daný tvar. Hloubka pohybu výstupku určuje míru proniknutí daného tvaru.
2. Vtahovací: Plech se přetáhne přes daný tvar do dutiny tažnice. [23]



Obrázek 26. Typy brzdnych drážek. a) běžná brzdna drážka, b) brzdna drážka s výběhem pro vysokopevnostní oceli, c) uzamčená brzdna drážka [23]

Úpravy polohy, délky a síly brzdnych drážek se provádějí ve fázi návrhu procesu, aby se vyrobil optimální lisovaný díl. Brzdne drážky lze také ručně upravit během fáze zkoušení, aby se dosáhlo požadovaného procesu. Při použití brzdnych drážek je důležité zvážit několik aspektů, abychom zajistili optimální podmínky pro tváření.

- potřebná síla přidržovače k vytvoření brzdne drážky během uzavírání přidržovačem,
- vliv brzdne drážky na tvar plechu po uzavření přidržovače,
- síla pro udržení uzavřených nástrojů během procesu tažení,
- změna vlastností materiálu v oblasti, která přešla přes brzdnu drážku (dodatečné deformace a napětí – v rovině a přes tloušťku, dodatečné pracovní zpevnění, dodatečné ztenčení),
- modifikovaný obrys polotovaru. [24]

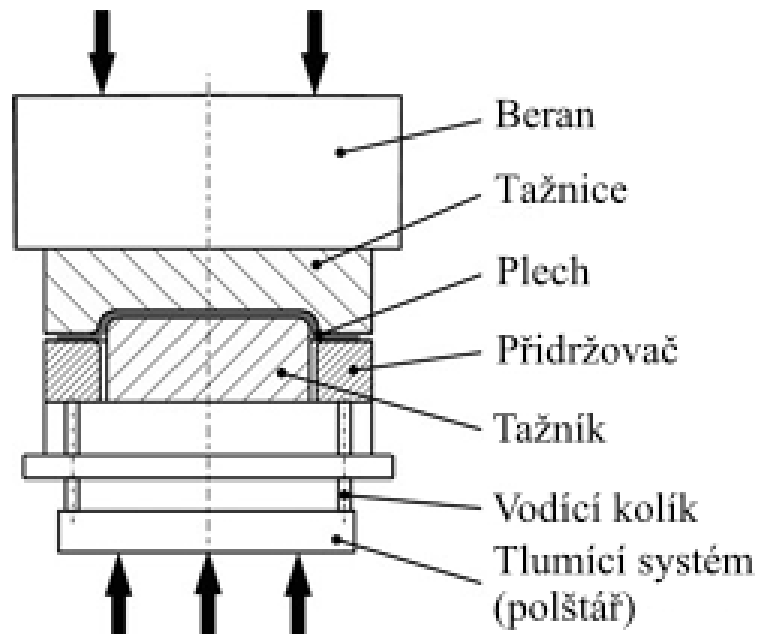
3.5 Konstrukce tvářecích nástrojů

Jak již bylo zmíněno v kapitole hlubokého tažení, tak nástrojem je tažidlo, které se skládá z tažníku a z tažnice často doplněné přidržovačem.

V závislosti na prováděné operaci mohou být tažné nástroje rozděleny na tažné nástroje pro první tah a pro další tahy. V obou těchto kategoriích mohou být tažné nástroje jednoduché, sdružené nebo speciální. Rovněž podle typu lisu mohou být tažné nástroje navrženy pro jednoúčelové, dvouúčelové nebo postupné lisy. Pokud je v konstrukci zahrnut i přidržovač lze jej rozdělit na pružinový, pryžový, pneumatický či hydraulický. [10]

Vzhledem k tomu, že proces hlubokého tažení není vždy stejný, může být zapojeno mnoho různých nástrojů.

Konstrukce tažných nástrojů pro hluboké tažení je ovlivněna konkrétním typem použitého procesu (např. hluboké tažení nebo zpětné tažení) a typem dostupného lisu (jednočinný nebo dvojčinný). Například v případě velkých jednočinných nástrojů pro hluboké tažení pro automobilový průmysl je tažník umístěn na lůžku lisu, zatímco přidržovač leží na pouzdrech matricového polštáře integrovaného do základny tažného lisu. Tažník zůstává upevněn na beranu, takže tažený díl po úplném zformování v nástroji připomíná klobouk s tažnou přírubou pod ním (viz obr. 27). [25]



Obrázek 27. Hlubokotažný nástroj pro jednočinný lis [25]

3.5.1 Tažník

Tažník může být buď celistvý nebo vložkový. Materiály používané k výrobě vložek jsou obdobné jako u vložek do tažnice. V tažnících se umísťují vložky na tažné hrany nebo dokonce na celou pracovní část tažníku. Pokud je potřeba zvýšit koeficient tření, jsou využívány vložky s drsným povrchem. Je důležité zajistit správné zavzdušnění prostoru výtažku u tažníku, což se často provádí vytvořením podélného kanálku v tažníku. Materiál pro celistvé tažníky je obvykle stejný jako pro celistvé tažnice. [26]

3.5.2 Tažnice

Obvykle jsou tažnice navrhovány jako jednokusové, avšak pro velké výtažky lze využít tažnic s vložkami, kde samotnou vložku tvoří pouze tažná hrana. Tato vložka je zpravidla vyrobena z nástrojových ocelí, někdy však mohou být použity i slinuté karbidy nebo keramika. Vložky jsou do zbytku tažnice nalisovány s určitým přepětím, které vzniká buďto vlivem ochlazení samotné vložky, nebo při nahřátí zděře před lisováním. Zbývající část tažnice bývá obvykle vyrobena z ekonomicky dostupnějšího materiálu třídy 11 nebo 12. V případě konstrukce jednokusové tažnice je často preferována nástrojová ocel, zatímco pro méně namáhané nástroje se obvykle volí ocel cementační. Pro velké a složité tvary tažnic se často využívá litina. Při navrhování tažnic je také zohledňována možnost úpravy zaoblení tažné hrany tažnice. [26]

4 MECHANICKÉ VLASTNOSTI

Hlavními charakteristikami každého výrobku jsou jeho mechanické vlastnosti, které vyjadřují odolnost vůči vnějším silám, ať už statickým nebo dynamickým. Tyto vlastnosti se stanovují prostřednictvím normalizovaných zkoušek. [27]

S rostoucí náročností na tvarování plechů roste důležitost předpovědi a hodnocení jejich vhodnosti pro danou technologii zpracování. Zkouška tahem a zkouška tvrdosti patří mezi základní zkoušky mechanických vlastností plechů. [2]

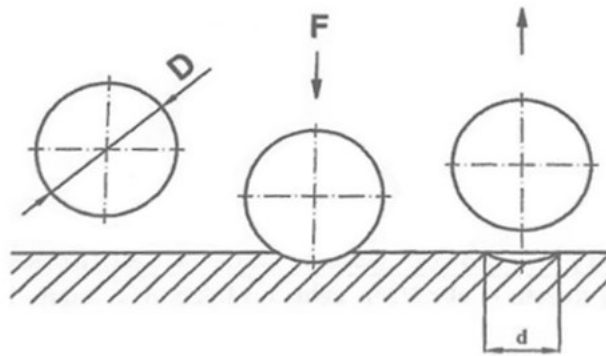
4.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdot je obecně definována jako odolnost materiálu vůči pronikání cizího objektu do jeho povrchu. Každá naměřená tvrdost závisí na různých faktorech, jako jsou elastické a plastické vlastnosti materiálu, jeho rozměry, velikost zatížení, tvar nástroje vtisku, rychlost a doba působení nástroje atd. Metoda měření tvrdosti spočívá v aplikaci malého nástroje (indentor) na povrch testovaného materiálu určitou silou za definovaných podmínek. Tvrdot se měří podle velikosti otisku, který vzniká při působení nástroje určitého tvaru (například kulička, kužel, jehlan). Jednou z výhod je možnost testování hotových výrobků bez jejich poškození či znehodnocení. Testy tvrdosti jsou klasifikovány podle toho, zda se jedná o zkoušky vrypové, vnikající nebo odrazové a dále podle toho, zda je zatížení statické nebo dynamické.

Pro měření tvrdosti tenkých hlubokotažných ocelových plechů je nejčastěji využívána Vickersova metoda, také je možné použít zkoušku podle Rockwella. U tlustých plechů se obvykle používá metoda měření tvrdosti podle Brinella, přičemž tloušťka testovaného plechu musí být minimálně osmkrát větší než hloubka vtisku. Test tvrdosti poskytuje náhled na pevnost a tvrdost zkoušeného plechu, avšak je důležité jej doplnit o technologické zkoušky, které důkladněji ověří tvárné vlastnosti plechu. [2], [27]

4.1.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella

Kulička z tvrdokovu nebo kalené oceli ($D = 10; 5; 2,5$ nebo 1 mm) vniká svisle do zkoušeného materiálu po stanovenou dobu (podle druhu materiálu 10 až 180 s, u ocelí 10 až 15 s) při definované zkušební síle F . Po odstranění zkušební síly se určí povrch trvalého vtisku S .



Obrázek 28. Zkouška tvrdosti podle Brinella [27]

Pro výpočet plochy povrchu vtisku se předpokládá, že indentor je ideálně tuhý a že vtisky jsou geometricky věrným obrazem indentoru.

Tvrdot podle Brinella je definována jako podíl zkušební síly a plochy povrchu trvalého vtisku a stanoví ze vztahu:

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{S} \quad (1)$$

Nebo:

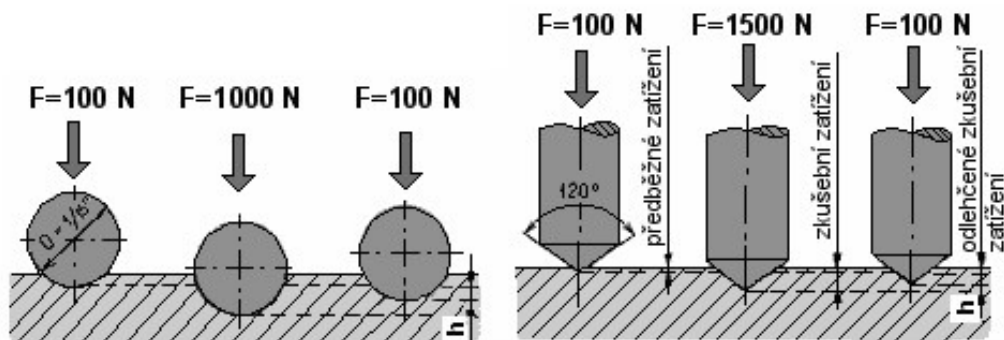
$$HB = \frac{2F}{\pi \cdot D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (2)$$

kde F je zatěžující síla [N]

S je plocha kulového vtisku [mm²] [27], [28]

4.1.2 Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Základ zkoušky spočívá vtlačení diamantového kuželu nebo tvrdokovové kuličky, případně kalené ocelové kuličky, do zkoumaného materiálu. Kužel má vrcholový úhel 120° a poloměr zaoblení vrcholu je 0,2 mm.



Obrázek 29. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – vlevo HRB a vpravo HRC [7]

Hrot nejprve vnikne do zkušební tělesa pod předběžnou zkušební silou F_0 až do hloubky vniku, která je definována jako referenční rovina pro budoucí měření. Stupnice tvrdoměru se nastaví na nulu a působí se dodatečnou zkušební silou F_1 . Po době působení přídavné zkušební síly definované v normách je dosaženo maximální hloubky proniknutí. Poté se zkušební síla F_1 odlehčí na zatížení F_0 a na hloubkoměru se odečte přímo tvrdost na příslušné stupnici. Mírou tvrdosti je tedy hloubka vtisku indentoru do zkoušeného materiálu po odstranění přídavného zatížení. [27], [28]

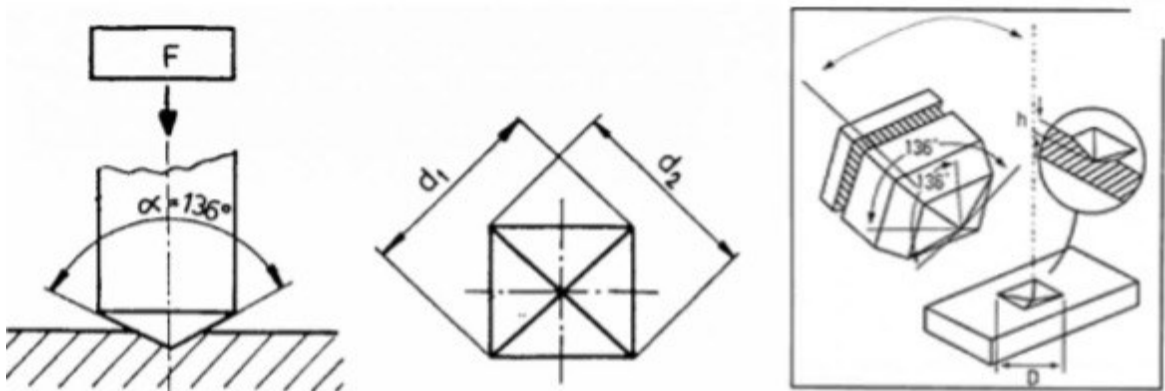
4.1.3 Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Základem zkoušky je vtlačení diamantového indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu s úhlem 136° do povrchu zkoušeného materiálu s určitou silou, která se může výrazně lišit podle materiálu a tloušťky vzorku.

Tvrdost dle Vickerse je označována jako HV a určuje se jako tlakové napětí na plochu vtisku, které se vypočítá jako podíl použitého zatížení a plochy vtisku. Po odlehčení se odečtou rozměry uhlopříček d_1 a d_2 vtisku, který zůstane na povrchu zkoušeného materiálu. Používaná zatížení se pohybují mezi 10 N a 1000 N.

Tato metoda je vhodná pro měření všech úrovní tvrdosti, je přesná a má minimální citlivost na změny zatížení. V praxi se tvrdost vypočítá podle jednoduchého vztahu, kdy je síla F vyjádřena v N a aritmetický průměr délek uhlopříček vtisku d v mm.

$$HV = 1,854 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (3)$$



Obrázek 30. Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Metoda měření tvrdosti podle Vickerse je považována za nejuniverzálnější způsob hodnocení tvrdosti materiálů. Její hlavní výhodou spočívá v tom, že zanechává malý vtisk, což umožňuje měřit tvrdost i u tenkých plechů a pásů pomocí jednoho typu indentoru. Tato

vlastnost je dosažena variabilitou použitých zatěžovacích sil. Důležitou vlastností této metody je také schopnost určit tvrdost jednotlivých fází struktury materiálu pomocí mikrotvrdosti.

4.2 Mikrotvrdost

Zkoušení mikrotvrdosti kovů je užitečné pro řadu aplikací, pro které nelze použít jiné zkušební metody. Měření mikrotvrdosti se využívá ke kontrole chemického složení, tepelného a povrchového zpracování. Je také užitečná pro měření drobných či tenkých součástí, strukturálních složek a fází, tenkých povlaků, svarů a křehkých materiálů.

Pro aplikaci této metody je nezbytné použít dostatečně malý indentor. Obvykle se používají nízké zatížení v rozmezí od 0,098 N do 1,960 N. Rozlišujeme dvě metody měření mikrotvrdosti a to:

- Měření podle Vickerse.
- Měření podle Knoopu.

Zkoušený povrch obvykle vyžaduje metalografickou úpravu čím menší je použité zatížení, tím vyšší je požadovaná úprava povrchu. K měření vrypů se používají přesné mikroskopy, které mají obvykle zvětšení přibližně $\times 500$ a měří s přesností na úrovni $\pm 0,5$ mikrometru. [29], [30]

4.2.1 Měření mikrotvrdosti podle Vickerse

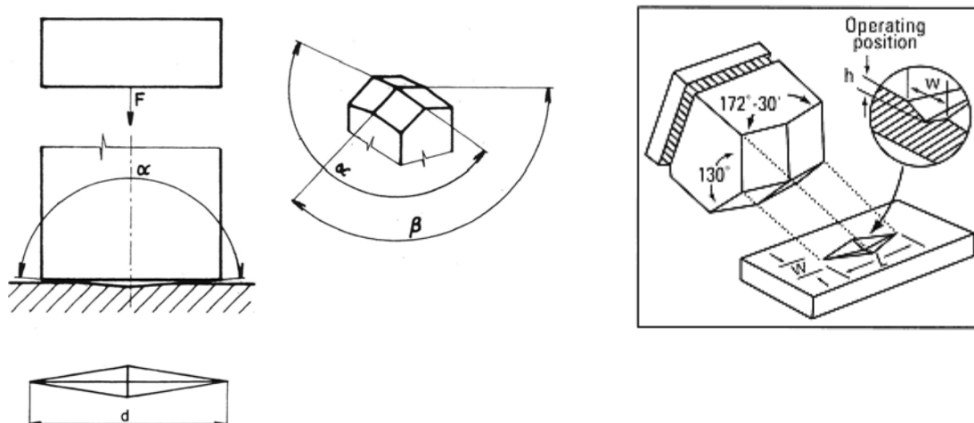
Měření mikrotvrdosti a tvrdosti podle Vickerse se principově a podstatou samotné zkoušky nijak zvlášť nemění. Jako indentor se používá opět pravidelný čtyřboký jehlan a hlavní rozdíl spočívá v míře konečného zatížení, které působí na indentor. [29]

Tabulka 3. Zkoušky tvrdosti podle Vickerse – typy zkoušek a rozsahy použití [7]

Označení	Označení tvrdosti HV	Zkušební zatížení F [N]
Zkouška tvrdosti podle Vickerse	$\geq HV 5$	$F \geq 49,03$
Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení	$HV 0,2 \text{ až } < HV 5$	$1,961 \leq F < 49,03$
Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse	$HV 0,01 \text{ až } < HV 0,2$	$0,09807 \leq F < 1,961$

4.2.2 Měření mikrotvrdosti podle Knoop

Knoopova zkouška tvrdosti je použitelná pro tenké kovy, pokovené povrchy, výjimečně tvrdé a křehké materiály, velmi mělké nauhličené nebo nitridované povrchy. Knoopův indentor je diamant vybroušený do tvaru protáhlého jehlanu a vytváří vrub s dlouhými a krátkými úhlopříčkami v poměru přibližně 7:1. Podélný úhel indentoru je 172 stupňů, 30 minut a příčný úhel 130 stupňů viz. obr. 31. [31]

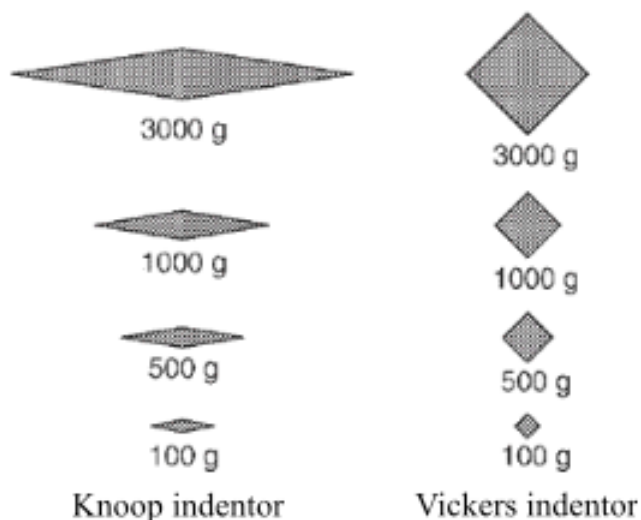


Obrázek 31. Podstata zkoušky tvrdosti podle Knoop [29]

Tvrdot podle Knoop lze vypočítat ze vztahu:

$$HK = 1,451 \cdot \frac{F}{d^2} \quad (4)$$

Příčmež HK je tvrdost podle Knoop, F je zatěžující síla v N a d je délka delší úhlopříčky v mm. Měřený povrch by měl být rovný bez škrábanců. [29]



Obrázek 32. Srovnání vtisku provedeného Knoopovým a Vickersovým indentorem do stejného materiálu a při stejném zatížení [32]

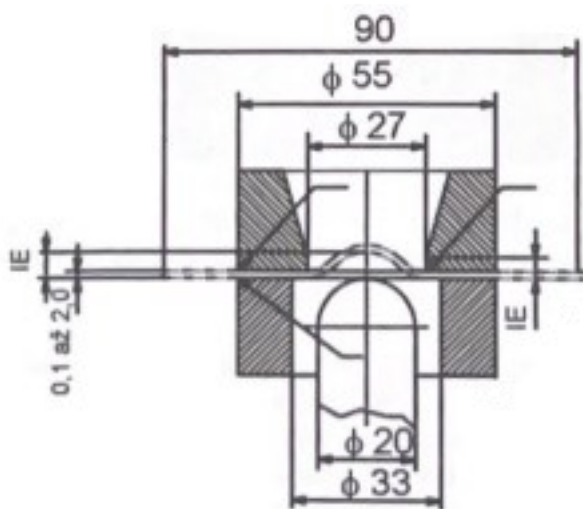
5 TECHNOLOGICKÉ ZKOUŠKY

Technologické zkoušky obvykle simulují proces výroby a stanovují podmínky a parametry, za nichž se tento proces provádí. Jejich hlavním cílem je často posoudit, zda je daný materiál vhodný nebo nevhodný, a to ideálně za podmínek co nejvíce odpovídajících skutečným výrobním technologiím. Mezi základní technologické zkoušky patří:

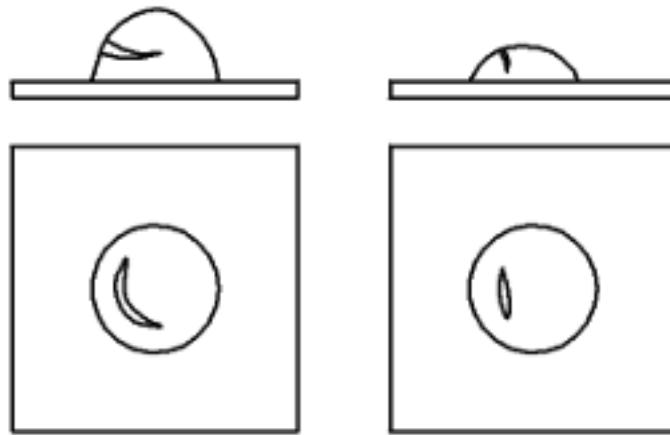
- Zkouška hloubení podle Erichsena.
- Zkouška kalíškovací (Schmiedtova).
- Zkouška podle Engelhardta – Grosse.
- Zkouška podle Siebela a Pompa.
- Zkouška podle Fukuiho.
- Hydraulická zkouška (Tomplenova).
- Zkouška LDH/Nakajima. [27]

5.1 Zkouška hloubení podle Erichsena

Jedním z prvních postupů pro hodnocení a stanovení tvářitelnosti plechů byla Erichsenova zkouška. Plech se umístí mezi tažnici a přídržovač a kulovým razníkem se deformuje. Tato operace se opakuje při nastavené rychlosti, dokud se na plechu nevytvoří první trhlina. Číslo IE, známé také jako Erichsenův index hloubení, je vzdálenost, kterou urazí razník od prvního kontaktu se vzorkem plechu do okamžiku, kdy se na plechu objeví trhlina. Jednotkou používanou pro číslo IE jsou milimetry. [33]



Obrázek 33. Zkouška hloubení podle Erichsena [27]



Obrázek 34. Tvary trhlin pro hlubokotažné plechy (vlevo) a nevhodné plechy pro hluboké tažení (vpravo) [27]

Tato zkouška je výhodná díky své jednoduchosti, kdy porovnáváme hloubku vtažení s hodnotami indexů uvedenými v materiálovém listu pro danou tloušťku plechu nebo s hodnotami srovnávaných materiálů. Nevýhodou je možnost ovlivnění výsledků drsností zkoušeného plechu a mazáním razníku. [27]

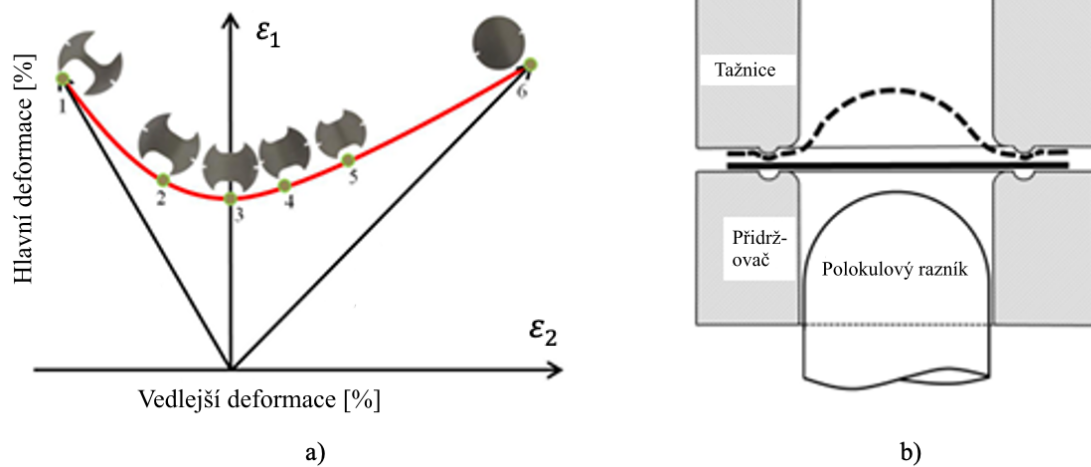
5.2 Zkouška LDH (Nakajima)

Zkouška LDH se používá ke stanovení tvářitelnosti plechů při různých poměrech menších a větších deformací pomocí vyhodnocení maximální výšky výtažku a je srovnatelná se zkouškou Nakajima. Principem zkoušky je tažení polokulovitého razníku do upnutého polotovaru pomocí přidržovače a žeber, které zabraňují vtažení plechu. Zkouška se ukončí po vzniku lomu nebo trhliny. [34]



Obrázek 35. a) zkušební těleso pro stanovení FLC křivek, b) tvary zkušebních vzorků pro různé oblasti FLD diagramu [34]

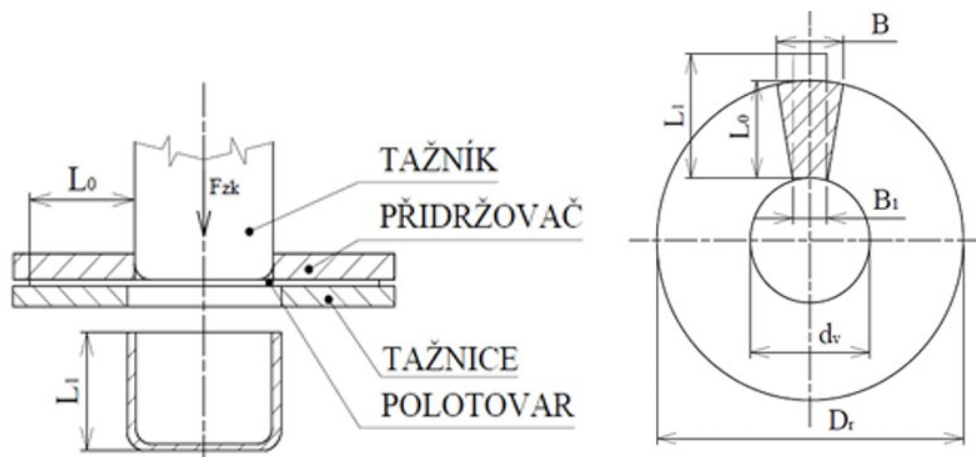
Protaháním křivky experimentálními body získanými ze vzorků různé šířky se získá diagram viz. obr. 36.



Obrázek 36. a) Schéma FLC křivky mezní tvářitelnosti b) Schéma LDH/Nakajima zkoušky [35]

5.3 Zkouška kalíškovací (Schmiedtova)

V kalíškovací zkoušce je hlavním principem postupné protahování kruhového výstřížku (rondelu) skrz otvor v tažnici tak, aby se vytvořil tvar válce s dnem. Plech je držen v matici určitým tlakem pomocí přidržovače, aby mohl volně klouzat mezi maticí a přidržovačem a nevytvářel při tažení zvlnění. Tento proces způsobuje složitou plastickou deformaci plechu s kombinovaným tahovým a tlakovým napětím. Opakovaným prováděním tohoto procesu s postupně rostoucím průměrem rondelu se určuje maximální průměr kruhového výstřížku, kterým lze jedním plynulým tahem vyrobit neporušený kalíšek požadovaného průměru. [27]



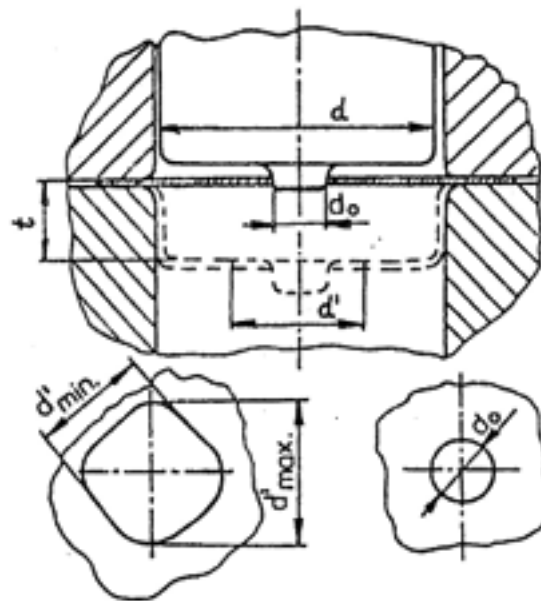
Obrázek 37. Princip kalíškovací zkoušky [2]

5.4 Zkouška podle Siebela – Pompa

Základní koncept zkoušky spočívá v rozšiřování otvoru ležícím na čtvercovém přístříhu o průměru d_0 , kde $d_0 = \frac{d}{3}$ [mm]. Přístřih je přidržován pomocí přidržovače a je tažen válcovým tažníkem s plochým čelem. Během tažení dochází k postupnému rozšiřování původního otvoru v přístříhu. Po objevení prvních radiálních trhlin se zkouška ukončí.

Následně se vyhodnotí hloubka prohloubení t , rozšíření otvoru d' a nerovnoměrnost deformace otvoru způsobená anizotropií mechanických vlastností plechu. Vyhodnocení lze vypočítat podle vztahu:

$$q = \frac{t \cdot (d'_{max} + d'_{min})^2}{4 \cdot d_0 \cdot (d'_{max} + d'_{min})} \text{ [mm]} \quad (5)$$



Obrázek 38. Princip zkoušky podle Siebela a Pompa [2]

Z výsledků zkoušky lze usoudit, že čím je větší hloubka tažení (t) a rozšíření otvoru (d') a při zachování co nejnižších hodnot anizotropie je plech schopen lepšímu tažení. [2]

5.5 Zkouška podle Fukuiho

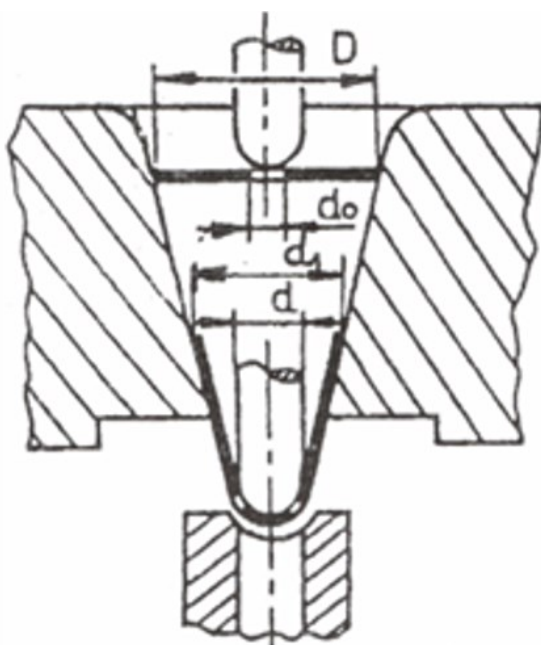
Fukuiho kuželová zkouška patří mezi zkoušky pro hodnocení tvárivosti plechů. Hodnotí se poměr průměrů, maximální tvářecí zatížení a hloubka kalichu. Princip spočívá v tažení kruhového rondelu s vyvrtaným otvorem případně bez otvoru, v kuželové tažnici do okamžiku vzniku trhliny v otvoru, případně na dně kuželového výtažku. Index tvárivosti je tedy vyjádřen jako poměr průměrů.

$$m_F = \frac{d_1}{D} [-] \quad (6)$$

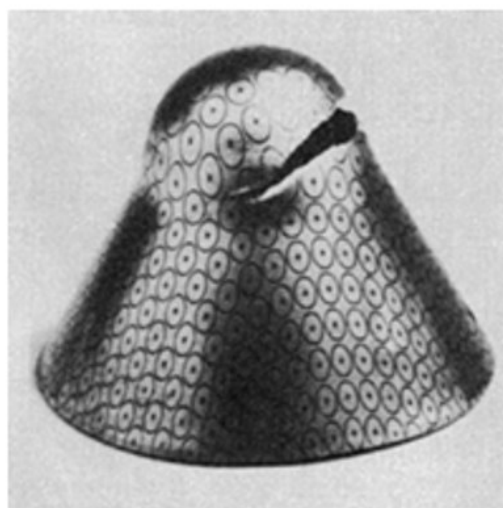
kde D je průměr rondelu (přístříhu) [mm]

d_1 je největší průměr kuželového výtažku [mm]

Čím menší je hodnota průměrného poměru, tím lepší je tvárivost plechu. V této zkoušce se studují charakteristiky tvárivosti plechů, jako jsou slitiny hliníku, slitiny měkké oceli a mosazné kazety, pomocí analýzy metodou konečných prvků. Ke stanovení anizotropie plechového materiálu lze použít kalíškovací zkoušku. Pokud je materiál izotropní, může dojít ke kruhovému lomu v místě nad kuličkou. [2], [36]



a)



b)

Obrázek 39. a) Princip zkoušky podle Fukuiho [13], b) Tvar trhliny při Fukuiho zkoušce [37]

6 SIMULACE HLUBOKÉHO TAŽENÍ

Simulace tváření plechů se v průmyslu často používá kvůli své rychlosti a nižším nákladům. Tato metoda se osvědčila v předpovídání tvaru, pružnosti a tváritelnosti výrobků. Cílem simulace je minimalizovat čas a náklady v návrhové fázi, předvídáním klíčových výsledků jako jsou vznik deformací a napětí, konečný tvar dílu, možné vady a tok materiálu. Přesnost simulace závisí na znalostech o materiálu, okrajových podmínkách a parametrech procesu. Díky tomu je možné přesně předpovědět vlastnosti výsledného výrobku a minimalizovat riziko vzniku vad či nedostatků. V automobilovém průmyslu je numerická simulace tváření plechů klíčovým prostředkem pro zkrácení doby vývoje a zlepšení kvality výrobků. [38]

6.1 Nastavení simulace

Simulace lze řešit dvěma způsoby. První možností je jednodušší řešení, které sice není tak přesné, ale za to je o dost rychlejší. Slouží k posouzení výrobitelnosti daného dílu. Využívá se implicitní numerické metody.

Druhý způsob zachycuje realističtější průběh procesu a je přesný. Tento přístup zahrnuje všechny relevantní podmínky a používá explicitní numerickou metodu. Výsledky těchto simulací jsou užitečné pro navrhování zařízení a jsou časově náročnější na vyhodnocení. Náročnost simulace závisí na různých faktorech, jako je složitost dílce, optimalizace parametrů, hustota sítě nebo použité algoritmy. Výpočet může trvat i desítky minut, přičemž menší prvky sítě obvykle znamenají delší dobu výpočtu. [39]

Prvním krokem je tvorba sítě konečných prvků. Podle velikosti dané součásti a hustoty sítě se zvyšuje nebo snižuje výpočetní doba a náročnost simulace. Součást je tedy rozdělena na jednotlivé elementy, které se matematicky snadno vyjádří. [40]

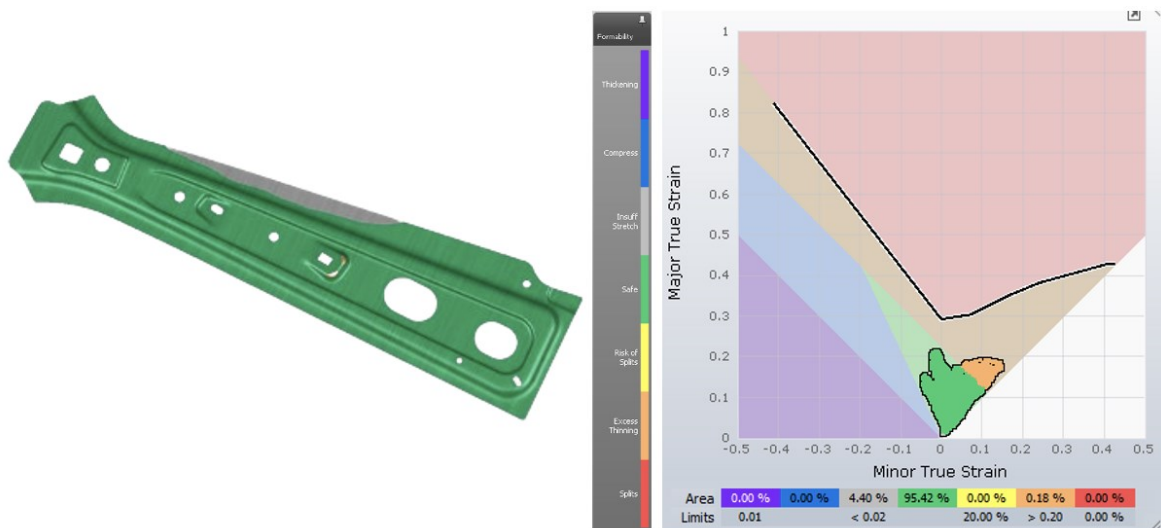
Dále se vložená součást vystředí tak, aby byla správně tažena. Poté se vybere materiál a tloušťka součásti. Protože AutoForm disponuje širokou databází je jednoduché přiřadit potřebný materiál a také výrobní stroj. Následně se podle složitosti součásti rozdělí výrobní plán do několika kroků, ve kterých dojde k tažení, odstřížení okrajů a vystřížení otvorů nebo kapes. Dalšími důležitými operacemi jsou určení přístřihu plechu, nastavení tažníku, přidržovače a brzd. Důležitou roli při tažení hraje také mazání.

6.2 Výsledky simulace

Výsledky simulace ukazují charakteristiky součásti při tváření a předvídání možných potíží, mezi které patří lisovatelnost, ztenčení, zvlnění a porušení dílu. Tyto predikce jsou zásadní pro optimalizaci výroby. Po vyhodnocení dojde k úpravě počátečních podmínek, které zlepší výsledek simulace a dosáhne se tak rychlejší optimalizace. Při každé analýze je klíčové znát mezní hodnoty daného výrobku. Tyto hodnoty zobrazují kritická místa během tváření. Maximální hodnoty mohou znamenat riziko prasknutí materiálu, zatímco minimální hodnoty mohou signalizovat nedostatečné využití materiálu nebo vznik napěchování materiálu. [41]

6.2.1 Tvářitelnost (Formability)

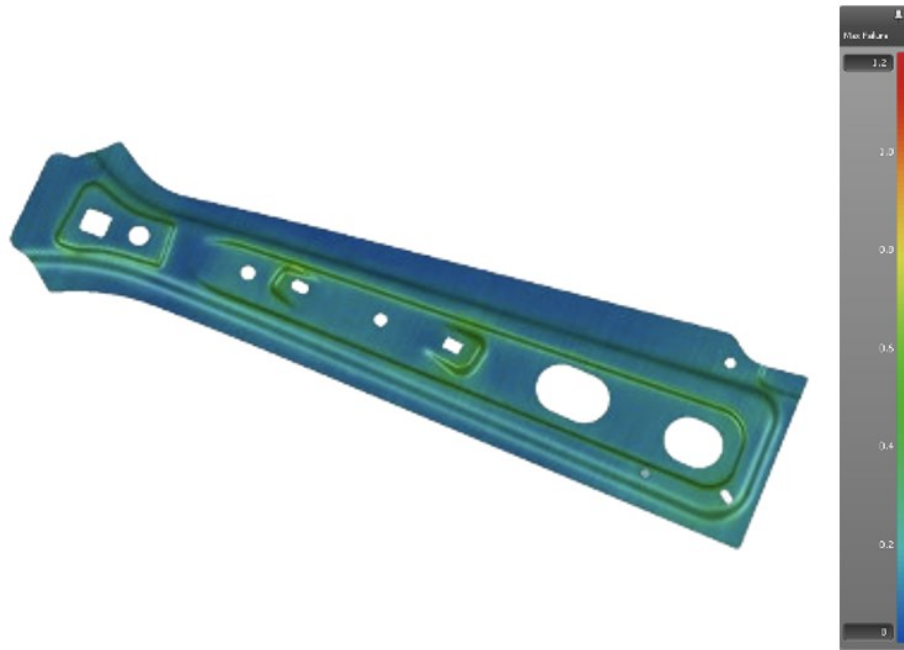
Hodnocení tvářitelnosti zobrazuje deformace výtažku. Cílem je dosáhnout co největších deformací výtažku při zachování ostatních simulovaných parametrů (porušení, ztenčení, zvlnění). Větší deformace výtažku přináší výhody při optimalizaci kritických rozměrů. Během analýzy se využívá barevná mapa, která ukazuje míru deformace jednotlivých elementů sítě výtažku. Stupeň deformace přímo ovlivňuje maximální napětí ve výtažku. [41]



Obrázek 40. Příklad výsledku tvářitelnosti s FLD grafem

6.2.2 Maximální porušení (Max failure)

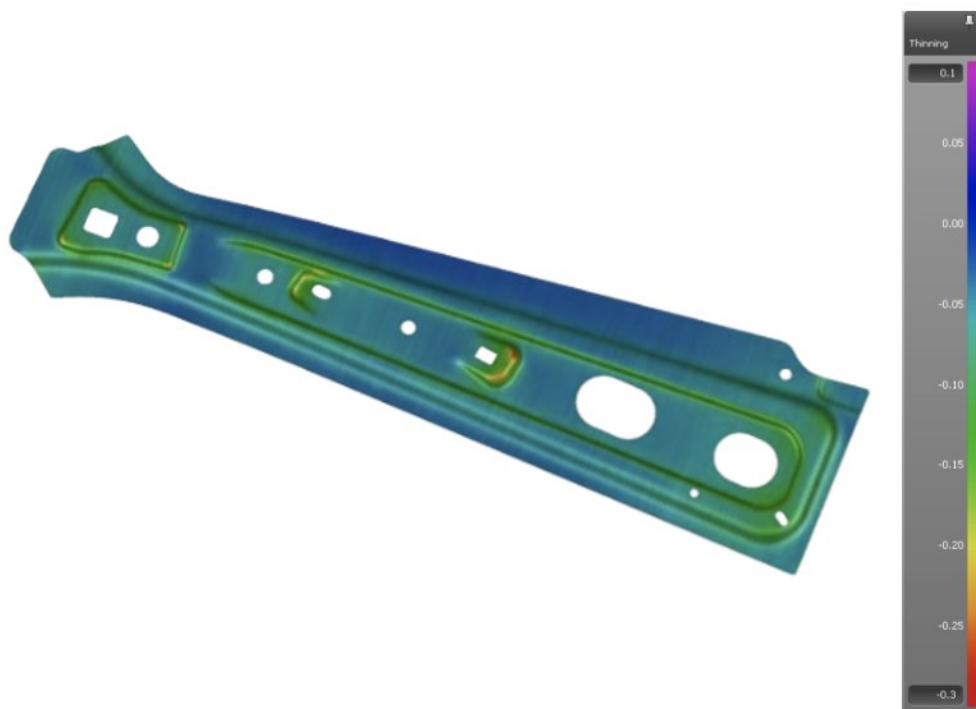
Hodnota Max failure vyjadřuje procentuální míru porušení výtažku a zobrazuje místa, která jsou více náchylná k porušení materiálu. Barevná škála se většinou pohybuje mezi hodnotami 0 a 1. Pokud hodnota přesáhne 1, dojde k porušení výtažku. Každý bod lze individuálně kontrolovat a identifikovat vzniklý problém. V praxi se nesmí přesáhnout stanovený limit (obvykle 0,8%), kvůli možným budoucím úpravám. [41]



Obrázek 41. Příklad výsledku Max failure

6.2.3 Ztenčení (Thinning)

Analýza ztenčení ukazuje, o kolik se výtažek ztenčil nebo napěchoval. Záporná čísla označují ztenčení a kladná čísla označují napěchování materiálu. Pokud bude překročeno 20 %, je nezbytné přezkoumat a upravit okrajové podmínky. Při překročení 30 % je výsledek již nevyhovující. [41]



Obrázek 42. Příklad výsledku Thinning

6.2.4 Zvlnění (Wrinkles)

Tato analýza ukazuje zvlnění výtažku při tažení. Zvlnění se opět určuje podle barevné stupnice a jsou obvykle velmi malé. Čím větší je hloubka výtažku a čím je plech tenčí, tím větší je riziko zvlnění. Tomuto zvlnění se předchází přidržovačem. [41]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

7 CÍLE DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cílem diplomové práce bylo otestovat tažení hliníkových plechů s vlivem na jejich mechanické vlastnosti. Tažení plechů proběhlo na zařízení BUP-600. Na tomto zařízení byly provedeny zkoušky podle Erichsena a Nakajimi s využitím brzdě drážky. Následně byly měřeny změny mechanických vlastností vlivem hlubokého tažení. V poslední řadě byly vytvořeny simulace v softwaru AutoForm R8, které byly využity pro porovnání s reálnými výsledky.

Hlavní zásady při vypracování:

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

8 VÝBĚR HLINÍKOVÉHO PLECHU PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ

Pro tažení byl vybrán hliníkový plech EN AW-1050A.

8.1 EN AW-1050A

Hliník EN AW 1050A (ČSN 42 4005) s obsahem hliníku 99,5% patří do řady 1000 a je považována za technicky čistý hliník. Mezi hlavní výhody této slitiny patří vysoká elektrická a tepelná vodivost, stejně jako odolnost vůči korozi. Tato slitina je nejčastěji využívána v elektrotechnice, chemickém průmyslu, energetice, architektuře a obalové technice. Je jednou z nejpoužívanějších slitin a používá se v mnoha průmyslových oblastech. Je známá svou výbornou odolností proti korozi, vysokou tvárností a svařitelností. Na druhou stranu není ideální pro obrábění. Pro plechy byl vybrán stav H24, který odpovídá polotvrdému plechu vhodnému ke tváření.

Tabulka 4. Chemické vlastnosti hliníku EN AW-1050A H24 dle ČSN EN 485-2+AI [42]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
min													99,50
max	0,25	0,40	0,05	0,05	0,05	.....	.....	0,07	0,05	.....	.....	0,03	

Tabulka 5. Mechanické vlastnosti hliníku EN AW 1050A H24 dle ČSN EN 573-3+AI [43]

Stav materiálu	Stanovená tloušťka [mm]		Pevnost v tahu R_m [MPa]		Mez v kluzu $R_{p0,2}$ [MPa]		Tažnost min. %		Poloměr ohybu		Tvrdo st HBW
	nad	do	min.	max.	min.	max.	$A_{50\text{ mm}}$	A	180°	90°	
H24	0,2	0,5	105	145	75		3		1,0t	0t	33
	0,5	1,5	105	145	75		4		1,0t	0,5t	33
	1,5	3,0	105	145	75		5		1,0t	1,0t	33
	3,0	6,0	105	145	75		8		1,0t	1,5t	33
	6,0	12,5	105	145	75		8			2,5t	33

9 TAŽENÍ HLINÍKOVÝCH PLECHŮ

Jedním z cílů diplomové práce bylo otestovat tažnost vybraných hliníkových plechů, které byly zkoušeny podle metody Erichsena a Nakajima. V metodě Nakajima byla navíc použita brzdná drážka. Byl vybrán hliníkový plech EN AW-1050A v tloušťkách 0,5 mm, 1 mm a 1,5 mm. Pro každou tloušťku byla provedena minimálně 3 měření.

9.1 Zkušební stroj

Pro tváření plechů byl využit vysoce výkonný univerzální zkušební stroj BUP 600 od společnosti Zwick/Roell. Tento stroj je ideální pro široké spektrum aplikací v oblasti materiálového testování, vývoje výrobků a kontrolních procesů. Vyniká vysokou přesností a opakovatelností měření. Kromě toho je vybaven rozsáhlým sortimentem měřicích senzorů a příslušenství umožňujících provádět různé typy testů, včetně tahových, tlakových, ohybových a lomových zkoušek materiálů. Stroj také umožňuje testovat účinky povrchových úprav, povlaků, maziv, nástrojů a parametrů metody při tváření. Mezi jeho výhody patří jednoduchá obsluha, dlouhá životnost, rychlá a snadná výměna nástrojů a snadná interpretace výsledků. Zařízení je navíc připojeno přímo s počítačem, který zpracovává a vyhodnocuje naměřená data.



Obrázek 43. Zkušební stroj BUP 600

Postup tažení probíhá následovně. Nejprve je přístřih plechu vložen do prostoru tažníku, kde se upne přidržovačem definovanou silou. Poté hydraulicky poháněný tažník deformuje plech zesponu a dochází tak k tažení.

Tabulka 6. Technický přehled zařízení BUP 600 Zwick/Roell

Maximální síla	600 kN
Maximální tloušťka plechu	10 mm
Maximální zkušební průměr	250 mm

9.2 Tažení vzorků

Jak již bylo psáno v předchozích kapitolách, pro tažení byl vybrán hliníkový plech EN AW-1050A v tloušťkách 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. Byly zvoleny dva druhy tahu. První byla metoda podle Erichsena a druhá metoda podle Nakajimi.

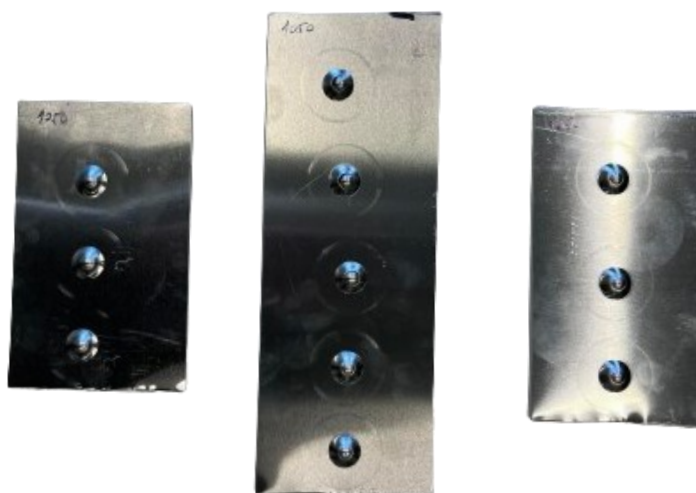
9.2.1 Zkouška podle Erichsena

Při této metodě byl využit tažník o průměru 18 mm. Následně byly na stroji BUP 600 nastaveny pracovní podmínky vhodné k tažení viz. tabulka 7.

Tabulka 7. Pracovní podmínky pro metodu podle Erichsena

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

Poté již proběhlo tažení jednotlivých plechů podle tloušťky. U každého vzorku byly provedeny vždy minimálně 3 zkoušky viz. obrázek.



Obrázek 44. Vzorky po tažení podle Erichsena (zleva plech 1,5 mm, 1,0 mm a 0,5 mm)

Vyhodnocená naměřená data byla zpracována v programu testXpert III. Každé měření obsahovalo vyhodnocené parametry jako sílu, při které došlo k porušení materiálu F_{Break} a hloubku tahu $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Podle tabulky 8 lze usoudit, že s rostoucí tloušťkou plechu roste potřebná síla k porušení materiálu F_{Break} a i hloubka tahu $\text{Travel}_{\text{Break}}$.

Tabulka 8. Výsledky tažení podle Erichsena

Tloušťka plechu	F_{Break} [kN]	$\text{Travel}_{\text{Break}}$ [mm]
0,5	2,098	5,571
0,5	2,110	5,536
0,5	2,066	5,570
1,0	3,776	6,542
1,0	3,803	6,535
1,0	3,845	6,608
1,5	5,664	7,814
1,5	5,682	7,583
1,5	5,742	7,494

Z Tabulky 9 lze vyčíst, že při metodě podle Erichsena se maximální síla zvedá s rostoucí tloušťkou.

9.2.2 Zkouška podle Nakajimi

Při této metodě byl využit tažník o průměru 60 mm a brzdná drážka. Následně byly na stroji BUP 600 nastaveny pracovní podmínky vhodné k tažení viz. tabulka 9.

Tabulka 9. Pracovní podmínky pro metodu podle Erichsena

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

Poté již proběhlo tažení jednotlivých plechů podle tloušťky. U každého vzorku byly provedeny vždy minimálně 3 zkoušky viz. obrázek.



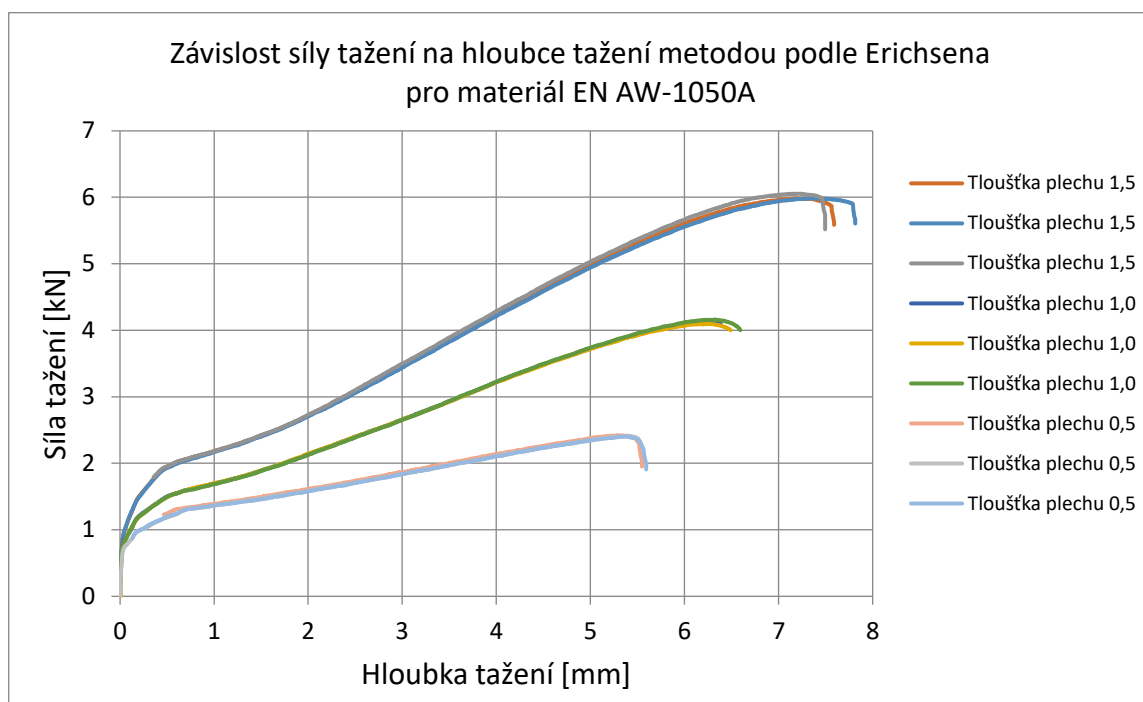
Obrázek 45. Vzorky po tažení podle Nakajimi (zleva plech 1,5 mm, 1,0 mm a 0,5 mm)
 Vyhodnocená naměřená data byla zpracována v programu testXpert III. Každé měření obsahovalo vyhodnocené parametry jako sílu, při které došlo k porušení materiálu F_{Break} a hloubku tahu $\text{Travel}_{\text{Break}}$. Podle tabulky 10 lze usoudit, že s rostoucí tloušťkou plechu roste potřebná síla k porušení materiálu F_{Break} a i hloubka tahu $\text{Travel}_{\text{Break}}$.

Tabulka 10. Výsledky tažení podle Nakajimi

Tloušťka plechu	F_{Break} [kN]	$\text{Travel}_{\text{Break}}$ [mm]
0,5	5,052	16,543
0,5	4,673	16,754
0,5	4,994	16,549
1,0	9,795	18,799
1,0	9,747	18,8138
1,0	9,272	17,463
1,5	15,317	19,248
1,5	15,214	18,972
1,5	15,038	18,854

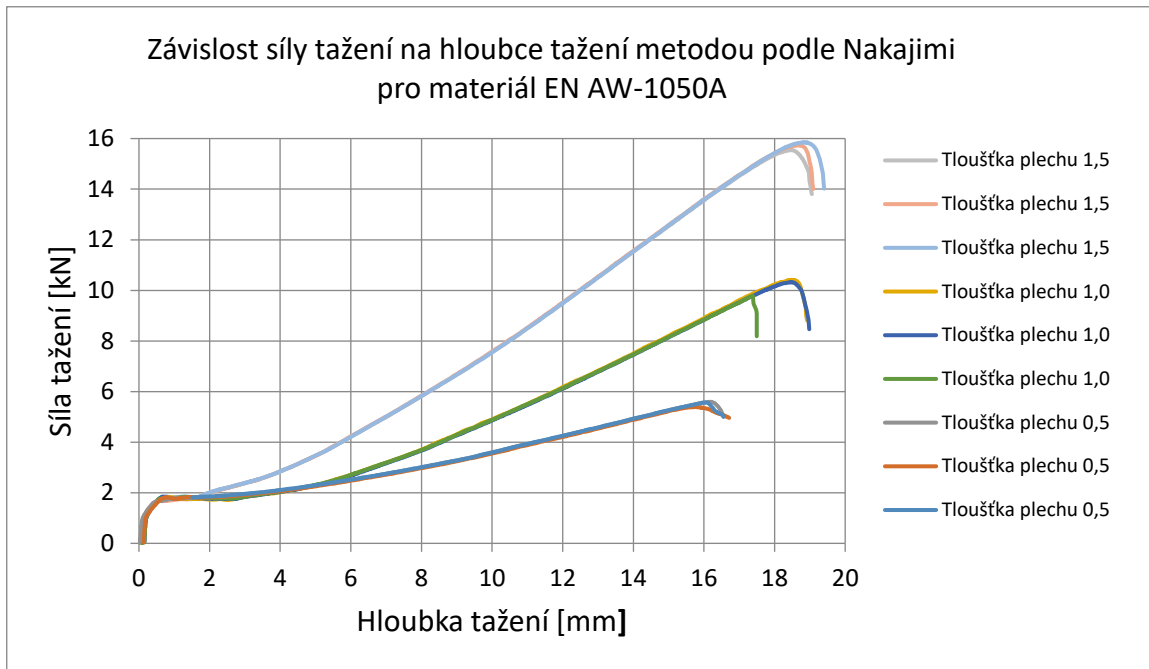
9.2.3 Výsledky tažení

Průběh tažení lze popsat podle dat získaných ze zařízení BUP 600 a to konkrétně ze síly tažení a hloubce tažení. Síla tažení stoupá až do vzniku první trhliny, poté dojde k poklesu této síly. U tloušťky plechu 1,0 mm byla použita skoro o 30 % menší síla jak u plechu tloušťky 1,5 mm. A u tloušťky plechu 0,5 mm byla použita o 40 % menší síla než u plechu tloušťky 1,0 mm. Z tohoto chování a z grafu lze usoudit, že pro tenčí plechy je potřeba menších sil a lépe se táhnou. To je zapříčiněno vyšší flexibilitou, větším poměrem tloušťky k průměru ohybu a homogenitě materiálu.



Obrázek 46. Graf závislosti síly tažení na hloubce tažení podle Erichsena pro materiál EN AW-1050A

U metody podle Nakajimi byl použit větší průměr tažníku a brzdící drážka, což mělo za následek naměření vyšších hodnot. U tloušťky plechu 1,0 mm byla použita zhruba o 35 % menší síla jak u plechu tloušťky 1,5 mm. A u tloušťky plechu 0,5 mm byla použita skoro o 50 % menší síla než u plechu tloušťky 1,0 mm.



Obrázek 47. Graf závislosti síly tažení na hloubce tažení podle Nakajimi pro materiál EN AW-1050A

10 SIMULACE TAŽENÍ V PROGRAMU AUTOFORM R8

V této kapitole byl využit program AutoForm R8, který sloužil pro porovnání simulace tažení s reálnými výsledky. V rámci porovnání byly analyzovány deformace materiálu, napětí a tahové síly v průběhu tažení. Tento komparativní přístup umožnil zhodnotit kvalitu simulace a tažnost hliníku.

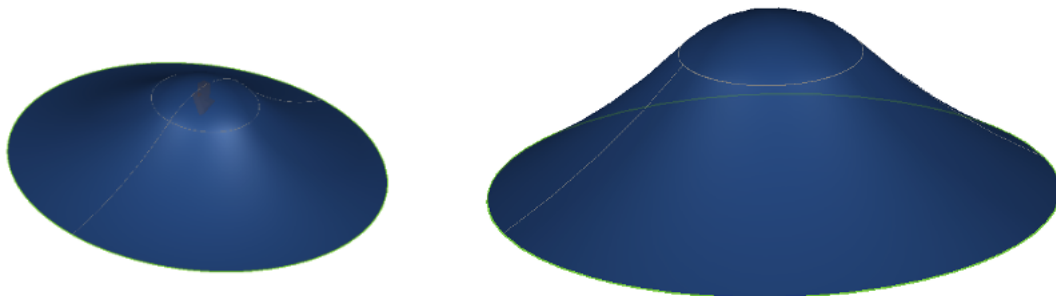
10.1 Nastavení parametrů simulace

Správné nastavení základních parametrů v programu AutoForm R8 může pomoci minimalizovat chyby a optimalizovat proces tváření, což může vést ke zlepšení výrobních procesů, snížení nákladů a rychlejšího dosažení požadovaných výsledků.

Pro metodu podle Erichsena a Nakajimi byly vytvořeny simulace pro každou tloušťku plechu, tedy celkově 6 simulací. Následně se tyto simulace porovnály s reálnými výsledky.

10.1.1 Model součásti

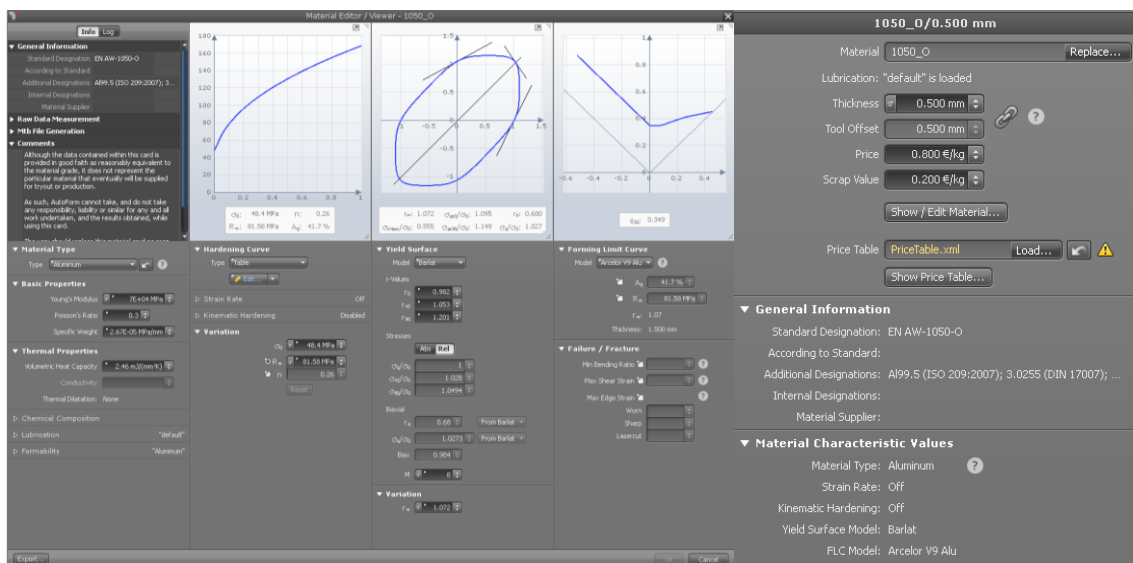
Modely součásti pro simulaci byly vytvořeny v programu Siemens NX a tvar těchto modelů by měl odpovídat reálnému výtažku. Modely byly následně naimportovány do programu AutoForm a určil se směr tažení.



Obrázek 48. Model součásti podle Erichsena (vlevo) a podle Nakajimi (vpravo)

10.1.2 Materiál a tloušťka plechu

Dalším krokem bylo nutné zvolit materiál. Ten byl jednoduše přiřazen z databáze, kterou poskytuje AutoForm. Po přiřazení materiálu EN AW-1050 byla také zadána tloušťka plechu. Protože se budou dělat simulace pro tři tloušťky plechu je nutné po každé změně tloušťky provést kontrolu procesu (Formcheck), aby byly zkontrolovány možné vzniklé chyby.



Obrázek 49. Tabulka vlastností materiálu EN AW-1050A a volba tloušťky plechu

10.1.3 Volba stroje a výrobního plánu

AutoForm obsahuje i databázi strojů ve které se opět jednoduše vybere požadovaný stroj. Protože se v této databázi zařízení BUP 600 nenacházelo, byl zvolen stroj PressLine 1800T. Na tomto stroji byly zvoleny stejné pracovní parametry jako na stroji BUP 600, tudíž výsledná simulace nebude ovlivněna.

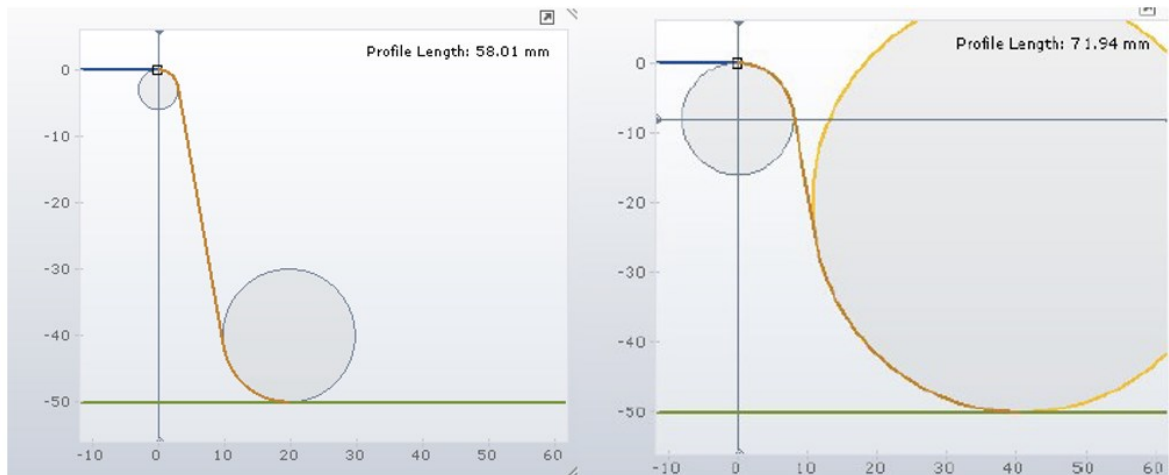


Obrázek 50. Výrobní plán

Po zvolení stroje se automaticky navrhne postup jednotlivých operací při tažení. Protože s vytaženým plechem se bude ještě dále pracovat kvůli měření mechanických vlastností, operace T-30 (odstřížení okrajů) je přeskočena a proběhne pouze operace tažení D-20.

10.1.4 Nastavení tažníku a přidržovače

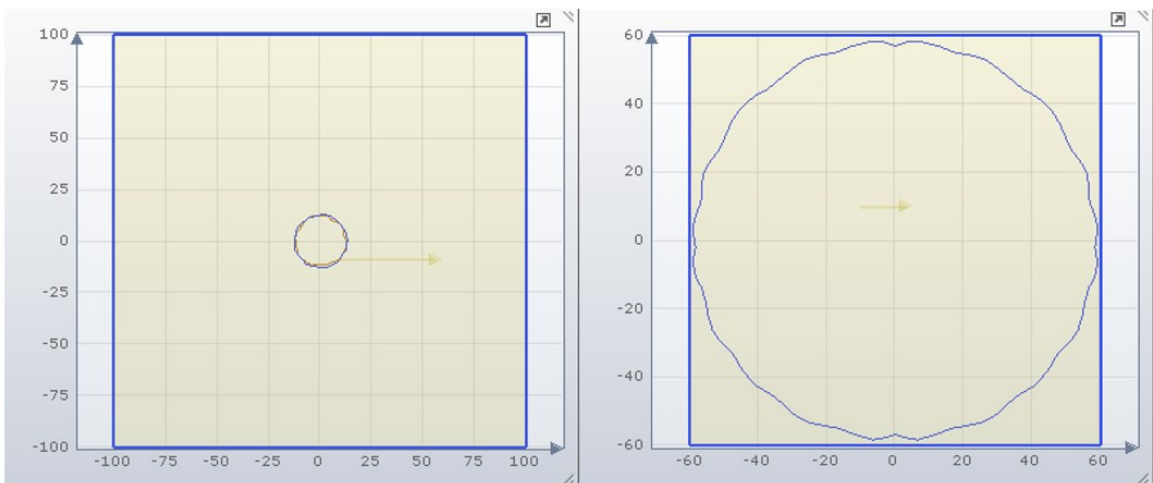
Nastavení tažníku a přidržovače bylo zvoleno automaticky. Jediná změna nastala v nastavení geometrie tažníku. Pro metodu podle Erichsena byl zvolen tažník o průměru 18 mm, a proto se horní kružnice nastavila na poloměr $R = 3$ mm a spodní kružnice na $R = 9$ mm. Pro metodu podle Nakajimi byl zvolen tažník o průměru 60 mm a horní kružnice se nastavila na poloměr $R = 8$ mm a spodní kružnice na $R = 30$ mm. Vzdálenost mezi kružnicemi byla nastavena také automaticky.



Obrázek 51. Nastavení geometrie tažníku pro metodu podle Erichsena (vlevo) a metodu podle Nakajima (vpravo)

10.1.5 Přístřih plechu

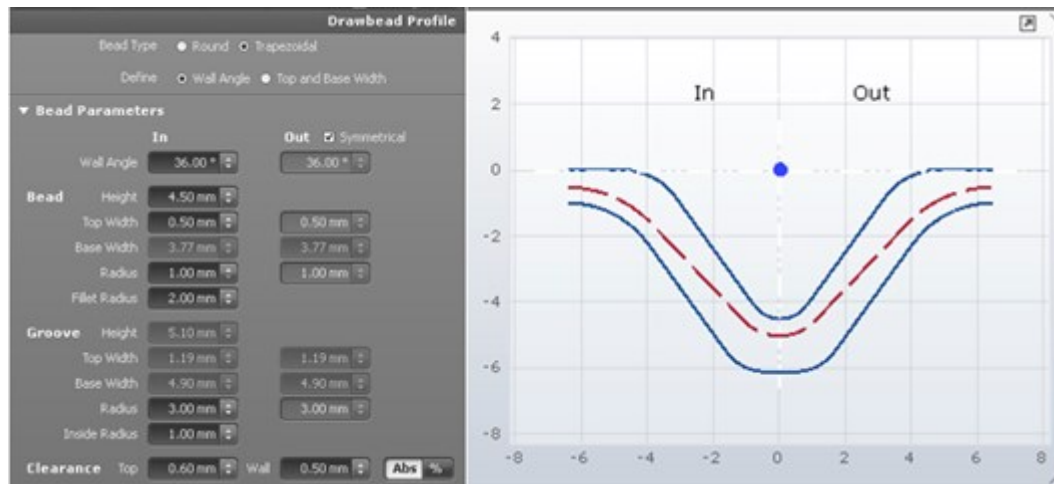
Jako přístřih plechu byl zvolen čtvercový tvar, kdy u metody podle Erichsena byla délka strany 200 mm a u metody podle Nakajimi délka strany 120 mm.



Obrázek 52. Přístřih plechu podle Erichsena (vlevo) a podle Nakajima (vpravo)

10.1.6 Brzdící drážka

Brzdná drážka byla použita jen u metody podle Nakajima. Bylo nutné definovat základní geometrii brzdy. Profil brzdné drážky byl zvolen lichoběžníkový a jednotlivé rozměry jsou uvedeny na obrázku 53.



Obrázek 53. Geometrie drážky

10.2 Výsledky simulací

Výše uvedený postup nastavení byl použit u všech plechů stejně, pouze s tím rozdílem, že se upravovala tloušťka plechu a importovaný díl pro tažení podle Erichsena a podle Nakajima. Na základě toho stačilo popsat postup jen pro jeden případ tažení.

Pro popsání všech výtažků byl využit FLD diagram, který slouží pro posouzení tvářitelnosti a v simulaci ukázal nebezpečné oblasti, ve kterých může dojít k porušení materiálu. Tyto výsledky simulace se následně porovnály s reálnými výsledky. Největší ohled se bere na tyto parametry:

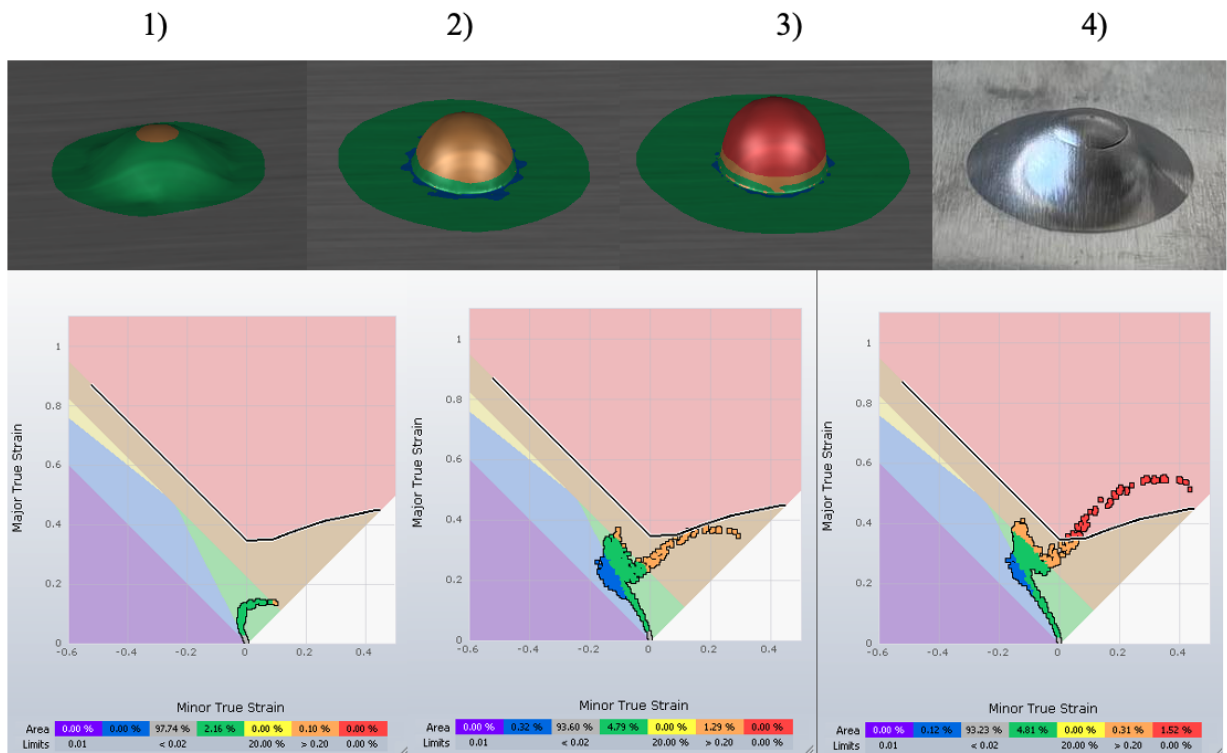
- Tvářitelnost (Formability).
- Maximální porušení (Max failure).
- Ztenčení (Thinning).
- Zvlnění (Wrinkles).

Thickening	Oblast zvlnění
Compress	Stlačení materiálu
Insuff Stretch	Nevyužitý materiál
Safe	Bezpečná oblast
Risk of Splits	Oblast možného vzniku trhlin
Excess Thinning	Nadměrné ztenčení
Splits	Vznik trhlin

Obrázek 54. Popis FLD diagramu

10.2.1 Erichsen – tloušťka plechu 0,5 mm (EN AW-1050A)

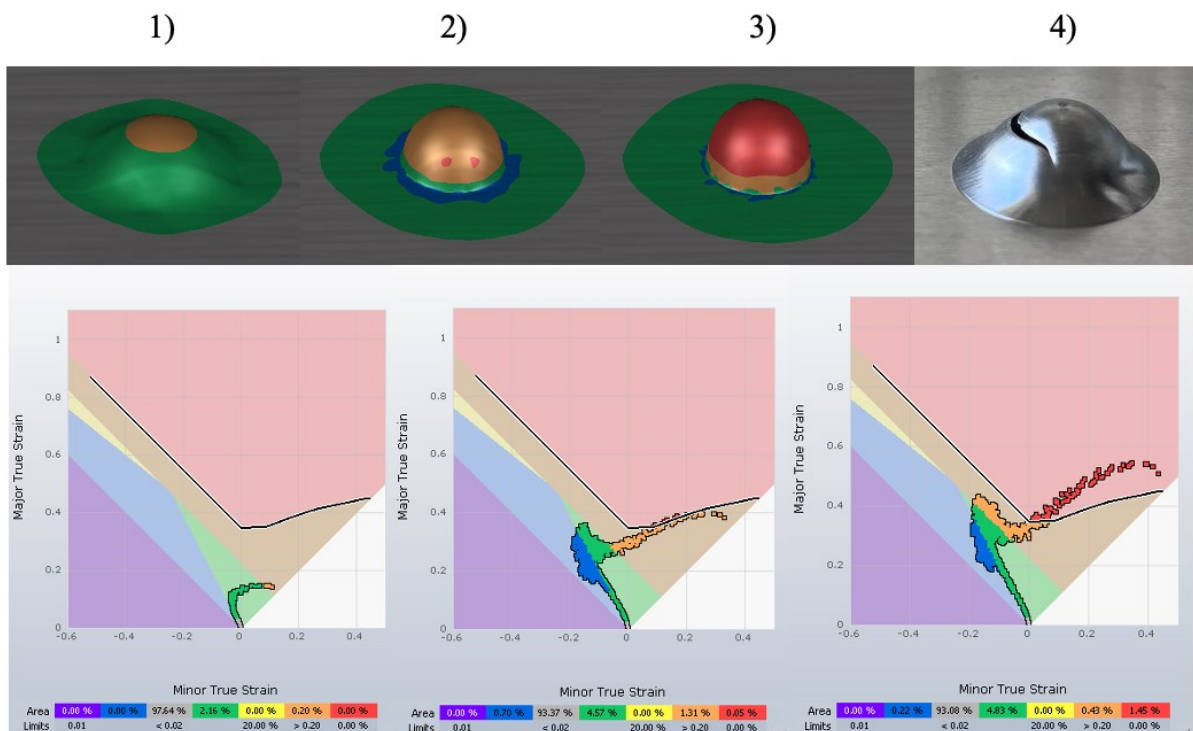
Jako první byla provedena simulace plechu o tloušťce 0,5 mm. Průběh simulace je vyobrazen ve 3 krocích, kdy pod každým krokem tažení je přiřazen FLD diagram s jeho průběhem. Krok 4) zobrazuje reálný výsledek. V prvním kroku je znázorněn začátek tažení, ve druhém kroku dochází ve výtažku k nadměrnému ztenčení a v posledním 3 kroku již došlo k porušení materiálu. Z posledního kroku lze vyčíst tvářitelnost daného plechu. Velký přístřih plechu způsobuje, že 93,23 % materiálu je nevyužito. Oblast nebezpečí vzniku trhliny 1,52 % se nachází v horní části výtažku což odpovídá reálnému výsledku, kde došlo ke vzniku trhliny. 0,31 % plechu se nachází v oblasti nadměrného ztenčení a 0,12 % oblasti plechu je vtahováno. Protože cílem bylo porovnat simulaci s reálným tažením, tak vůbec nevadí, že se jen 4,81 % plechu nachází v bezpečné oblasti.



Obrázek 55. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 0,5 mm

10.2.2 Erichsen – tloušťka plechu 1,0 mm (EN AW-1050A)

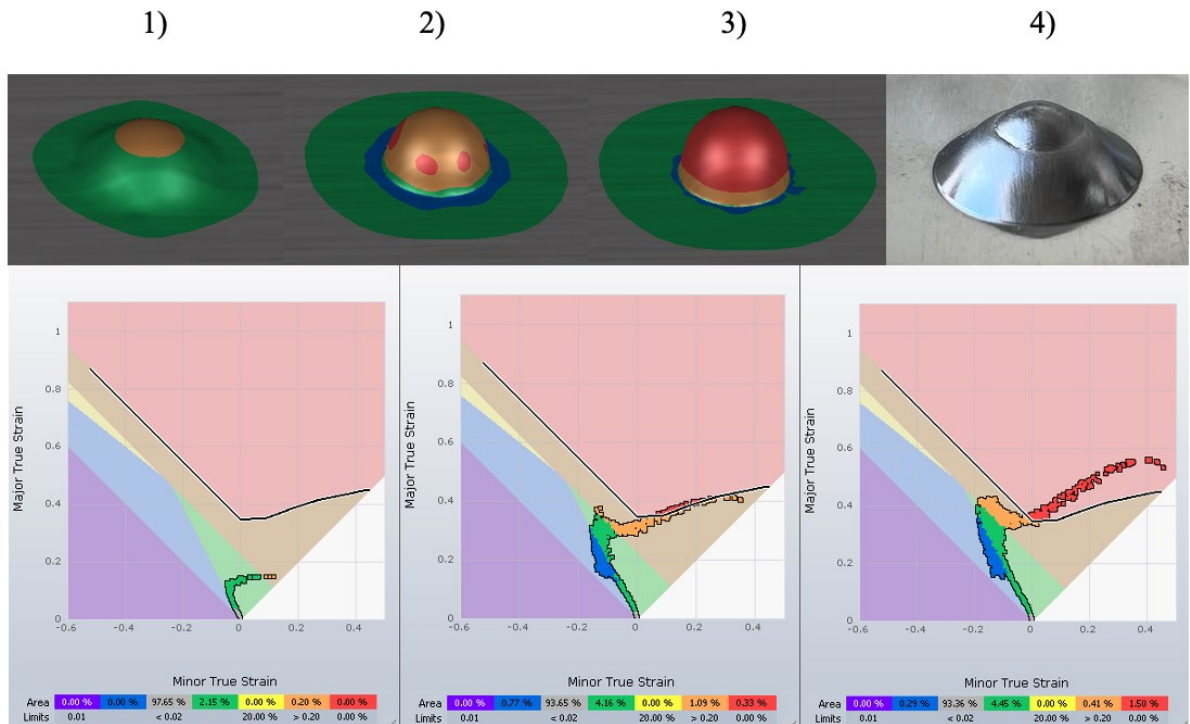
Plech o tloušťce 1,0 mm byl opět zpracován ve třech krocích. První fáze zahrnuje začátek tažení, ve druhém kroku dochází k porušení materiálu v určitých oblastech po obvodu výtažku a v posledním kroku již vzniká trhlina po obvodu výtažku (viz obr. 55, krok 4). Z hlediska tvářitelnosti je 93,08 % materiálu nevyužito, 1,45 % se nachází v oblasti vzniku trhliny, 0,43 % je v oblasti nadměrného ztenčení, 0,22 % materiálu je vtahováno a 4,83 % je v bezpečné oblasti.



Obrázek 56. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 1,0 mm

10.2.3 Erichsen – tloušťka plechu 1,5 mm (EN AW-1050A)

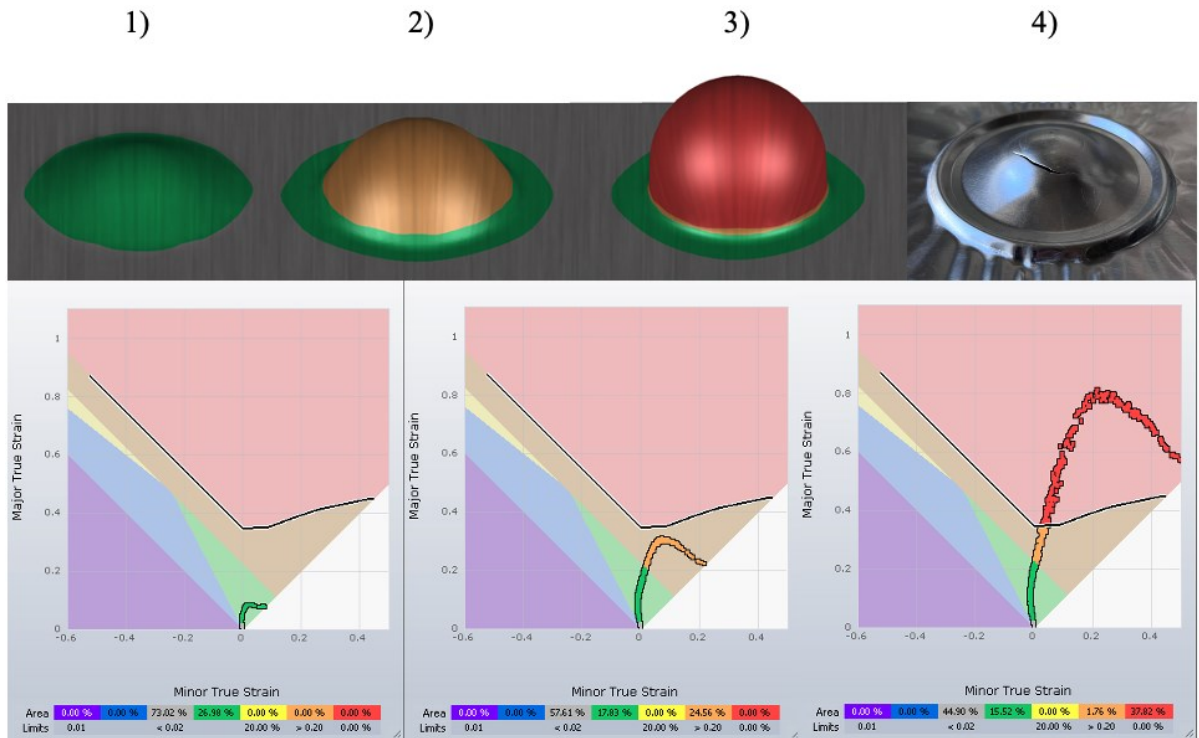
Poslední simulace u této metody byla vytvořena pro plech o tloušťce 1,5 mm. V prvním kroku je zobrazen začátek tažení, ve druhém kroku se opět vyskytli oblasti na obvodu výtažku, kde došlo k porušení materiálu a ve třetím kroku se vytvořila trhlina na vrcholu výtažku. Z hlediska tvářitelnosti je 93,36 % materiálu nevyužito, 0,41 % je v oblasti nadměrného ztenčení, 0,29 % materiálu je vtahováno, 1,50 % leží v oblasti vzniku trhliny a 4,45 % je v bezpečné oblasti.



Obrázek 57. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 1,5 mm

10.2.4 Nakajima – tloušťka plechu 0,5 mm (EN AW-1050A)

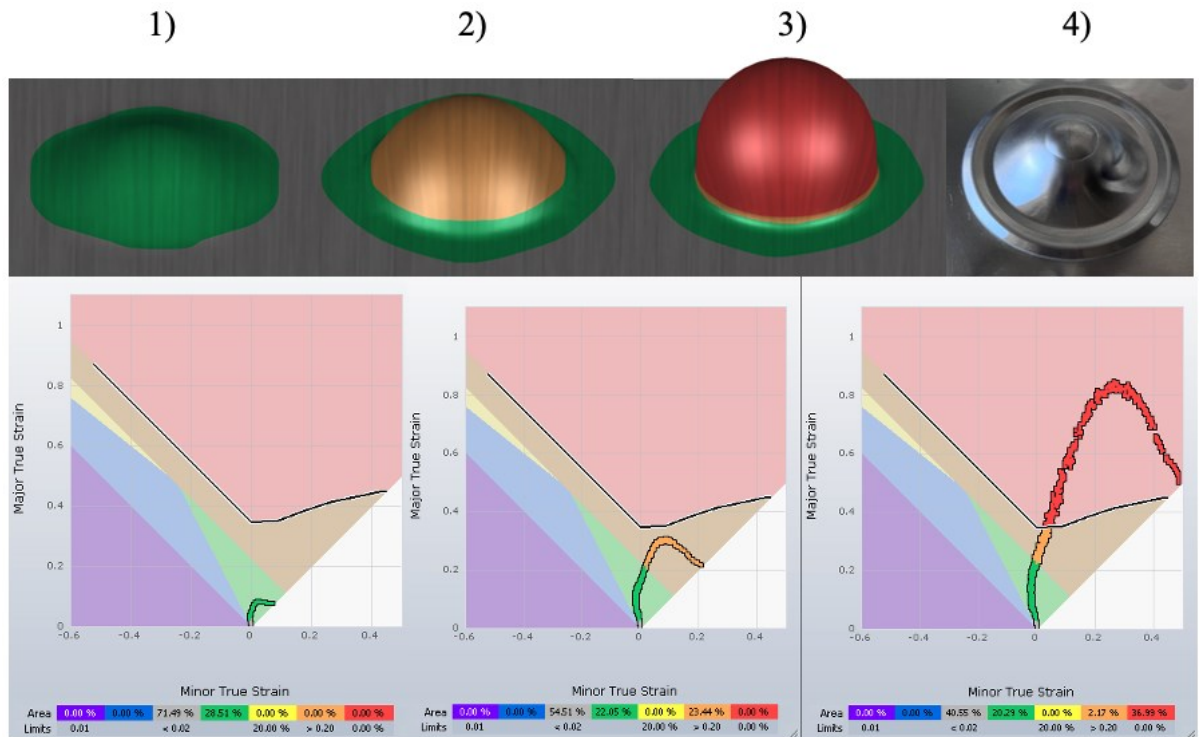
Průběh simulace je vyobrazen ve 3 krocích stejně jako u metody podle Erichsena. Krok 4) zobrazuje reálný výsledek. V prvním kroku je znázorněn začátek tažení. Ve druhém kroku dochází ve výtažku k nadměrnému ztenčení a v posledním 3 kroku již došlo k porušení materiálu. Použití většího průměru tažníku se projevilo i na tváritelnosti plechu, kde oproti metodě podle Erichsena došlo k většímu využití plechu a větší poruše materiálu. Z FLD diagramu lze vyčíst, že 44,9 % materiálu je nevyužito, 15,52 % plechu je v bezpečné oblasti, 1,76 % se nachází v oblasti nadměrného ztenčení a 37,82 % je v nebezpečné oblasti vzniku trhliny.



Obrázek 58. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Nakajima – 0,5 mm

10.2.5 Nakajima – tloušťka plechu 1,0 mm (EN AW-1050A)

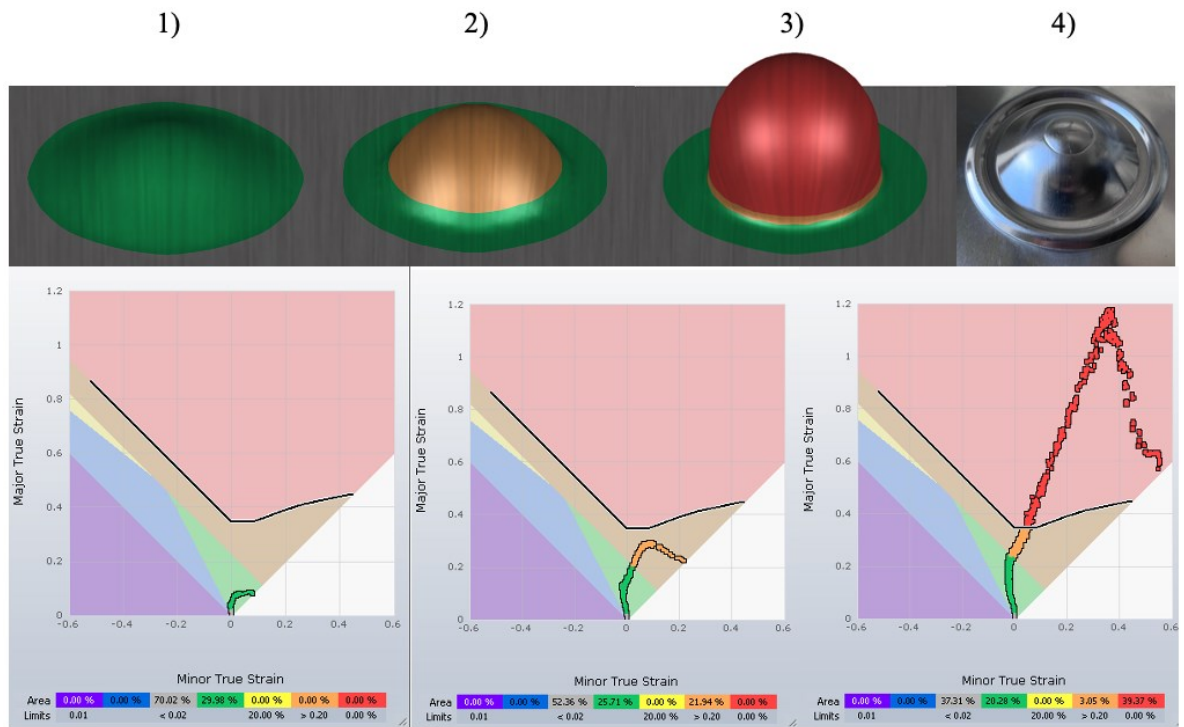
Druhá simulace plechu o tloušťce 1,0 mm je opět znázorněna ve 3 krocích. V prvním kroku je znázorněn začátek tažení, ve druhém kroku dochází ve výtažku k nadměrnému ztenčení a v posledním 3 kroku již došlo k porušení materiálu. Z FLD diagramu lze vyčíst, že 40,55 % materiálu je nevyužito, 20,29 % plechu je v bezpečné oblasti, 2,17 % se nachází v oblasti nadměrného ztenčení a 36,99 % oblasti je v nebezpečí vzniku trhliny.



Obrázek 59. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Nakajima – 1,0 mm

10.2.6 Nakajima – tloušťka plechu 1,5 mm (EN AW-1050A)

Poslední simulace plechu o tloušťce 1,5 mm je opět provedena ve 3 krocích. V prvním kroku je znázorněn začátek tažení, ve druhém kroku dochází ve výtažku k nadměrnému ztenčení a v posledním 3 kroku již došlo k porušení materiálu. Z FLD diagramu lze vyčíst, že 37,31 % materiálu je nevyužito, 20,28 % plechu je v bezpečné oblasti, 3,05 % se nachází v oblasti nadměrného ztenčení a 39,37 % je v oblasti nebezpečí vzniku trhliny.



Obrázek 60. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtazkem Nakajima – 1,5 mm

11 MĚŘENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Stěžejním cílem této diplomové práce bylo zjistit jaký má vliv tažení hliníkového plechu na jeho mechanické vlastnosti. Ty budou ovlivněny podle metody tažení Erichsen, Nakajima a tloušťkou plechu.

11.1 Příprava vzorků

Aby bylo možné změřit mechanické vlastnosti daných výtažků bylo nutné provést výřezy z jednotlivých vzorků. Tyto výřezy se následně zalisovali do práškové pryskyřice PhenoCure od firmy Buehler. U takto zalisovaných vzorků bylo nutné vybrousit povrch, aby bylo možné provést měření.

Pro broušení bylo využito zařízení AutoMet 250 opět od firmy Buehler. U zařízení byly nastaveny otáčky hlavy na 40 ot/min, otáčky brusného kotouče na 100 ot/min a přítlačná síla vzorků na brusný kotouč byla 20 N. Broušení bylo rozděleno do více kroků s různými drsnostmi a zrnitostí brusného papíru.



Obrázek 61. Brusné zařízení AutoMet 250

Takto vybroušené vzorky byly připraveny k měření mechanických vlastností.



Obrázek 62. Vybroušené vzorky vyřezaných segmentů

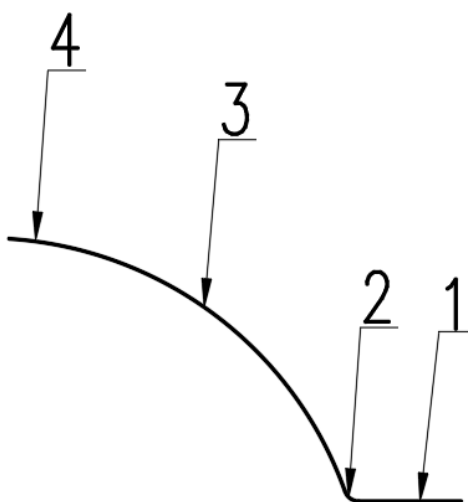
11.2 Měření oblastí

Jednotlivé výřezy byly rozděleny do určitých oblastí, kde byly měřeny změny mechanických vlastností.

11.2.1 Metoda podle Erichsena

U metody podle Erichsena byl výřez rozdělen na 4 měřené oblasti, kde se měřily mechanické vlastnosti.

1. Neovlivněná oblast hlubokého tažení.
2. Oblast počátku hlubokého tažení.
3. Oblast v průběhu hlubokého tažení.
4. Oblast vrcholu hlubokého tažení.

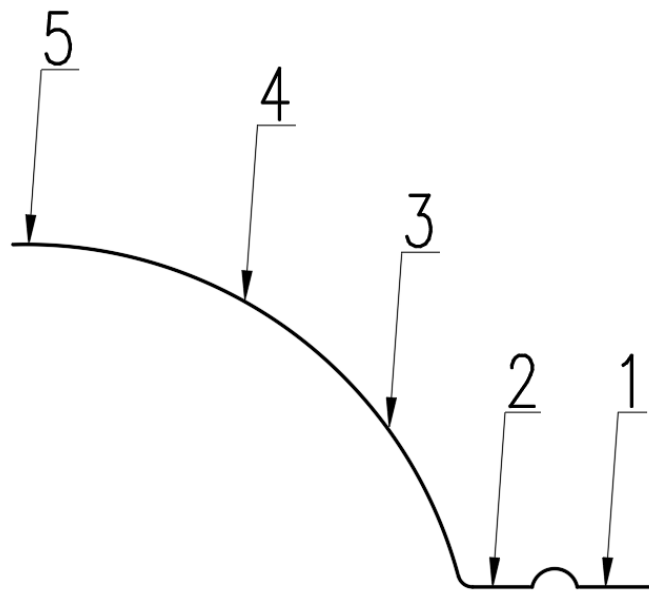


Obrázek 63. Oblasti měření podle metody Erichsena

11.2.2 Metoda podle Nakajima

Oproti metodě podle Erichsena byla u Nakajimi využita brzdící drážka. Výřez byl rozdělen do 5 oblastí, kde se měřily mechanické vlastnosti.

1. Oblast před brzdící drážkou.
2. Oblast za brzdící drážkou.
3. Spodní oblast průběhu hlubokého tažení.
4. Oblast průběhu hlubokého tažení.
5. Oblast vrcholu hlubokého tažení.



Obrázek 64. Oblasti měření podle metody Nakajima

11.3 Měřicí zařízení

Mechanické vlastnosti byly měřeny na zařízení Micro-Combi Tester od firmy CSM Instruments. Zařízení slouží pro stanovení tvrdosti a Youngova modulu v povrchových a hloubkových profilech materiálů, stanovení koeficientů tření a pro zkoušky únavy kontaktů. Obsahuje také videomikroskop.



Obrázek 65. Micro-Combi Tester

11.3.1 Postup měření

Jako první se vzorek upnul do zařízení a nastavila se měřící pozice pod mikroskopem. Toto nastavení ulehčil pohyblivý stůl, s kterým lze pohybovat v ose XY. Poté se definovaly základní parametry měření, mezi které patřila zatěžující síla 1 N, nastavení výdrže zatížení na 12 sekund a nastavení parametru měřící matice.

11.4 Výsledky měření

Naměřené výsledky mechanických vlastností z vybraných oblastí viz. obr. 63 a 64 byly zpracovány v prostředí Microsoft Excel. Tyto výsledky měření se budou interpretovat v grafech. Grafy jsou dány závislostí naměřené mechanické veličiny na oblasti měření, ve které se tato mechanická veličina naměřila. U každého grafu byly vyznačeny maximální a minimální naměřené hodnoty.

Mezi vyhodnocené výsledky patří:

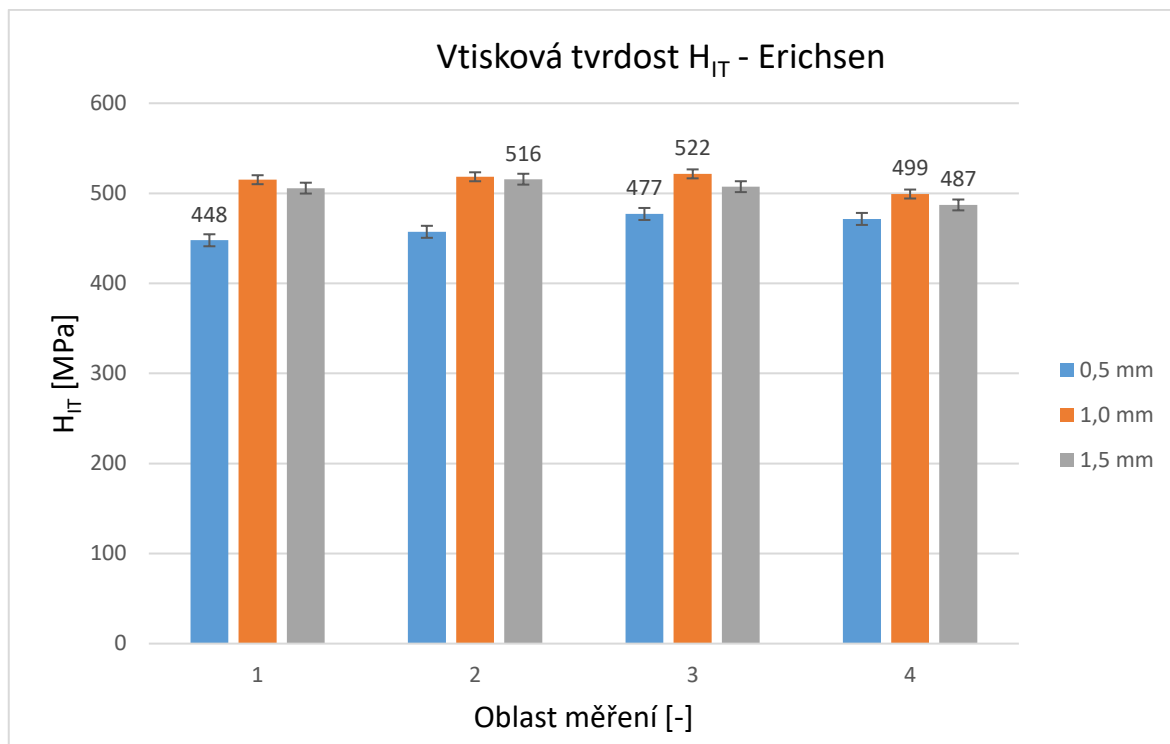
- vtisková tvrdost H_{IT} ,
- mikrotvrdost podle Vickerse H_{VIT} ,
- vtiskový modul pružnosti E_{IT} ,
- elastická práce W_{ELAST} ,
- plastická práce W_{PLAST} .

11.4.1 Vtisková tvrdost H_{IT}

Vtisková tvrdost je schopnost materiálu odolat trvalé deformaci nebo poškození. Během procesu tažení dochází ke zpevnění materiálu, a to způsobuje změnu tvrdosti.

Erichsen

Pro metodu podle Erichsena byly vyhodnoceny 4 oblasti pro tři tloušťky plechu 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. U plechu tloušťky 0,5 mm a 1,0 mm se dosáhne maximální tvrdosti v oblasti 3 a poté klesne. U plechu tl. 1,5 mm se dosáhlo maximální tvrdosti v oblasti 2 a poté také klesá. Tudíž lze říci, že vtisková tvrdost u všech tlouštěk plechu během procesu tažení narůstá a poté klesá.



Obrázek 66. Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} – Erichsen

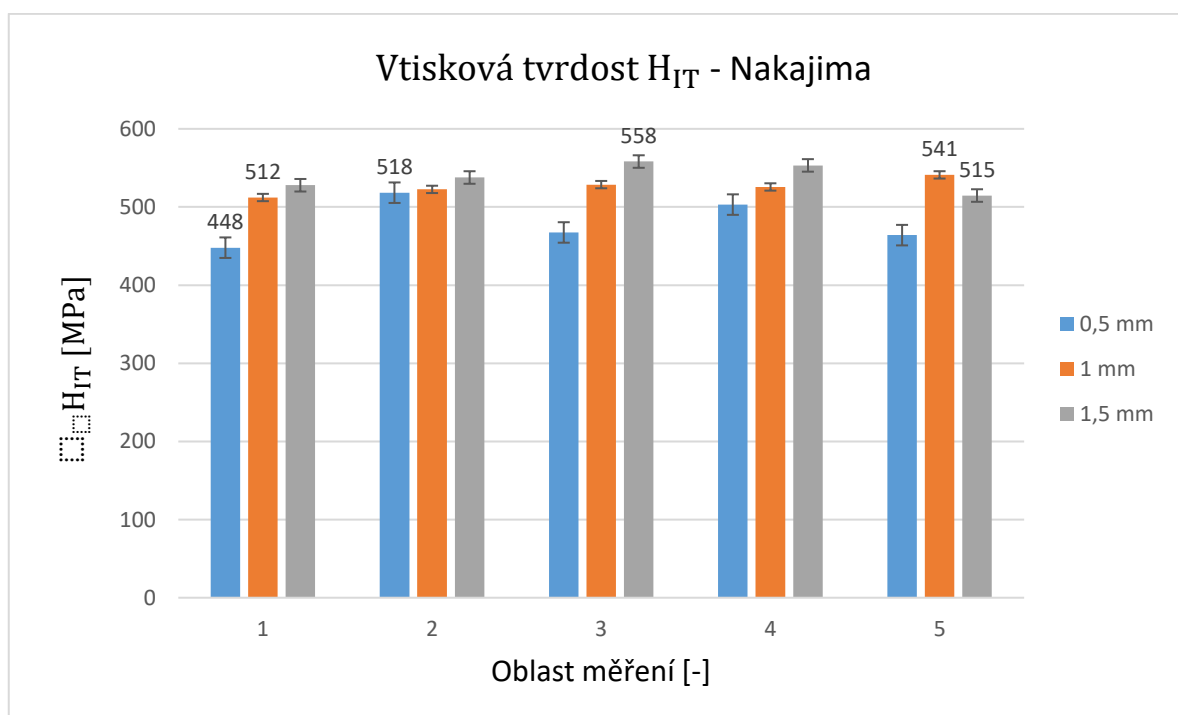
Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 3, kde bylo naměřeno maximum, došlo ke zvětšení tvrdosti o 6 % oproti neovlivněné oblasti 1. V této oblasti došlo během tažení ke zpevnění materiálu vlivem vzniklých deformací (zhuštění struktury materiálu), a to mělo za následek zvýšení tvrdosti. Kvůli koncentraci tahového napětí v této oblasti došlo následně ke vzniku trhliny na povrchu výtažku. Simulace potvrdila tuto oblast za nebezpečnou.

V případě plechu o tloušťce 1,0 mm došlo ke snížení tvrdosti o 3 % od neovlivněné oblasti do oblasti 4, kde se nachází vrcholek výtažku. To mohlo být způsobeno menším deformačním zpevněním během tažení.

To samé platilo i u plechu o tl. 1,5 mm, kde došlo také ke snížení tvrdosti v oblasti 4. Rozdíl tvrdosti byl skoro o 4 %.

Nakajima

Oproti metodě podle Erichsena není změna mechanických vlastností vlivem tažení v oblasti 1 není tak velká, protože leží před brzdící drážkou. Nárůst tvrdosti nastává až za brzdící drážkou což odpovídá oblasti 2. U tloušťky plechu 0,5 mm zde dochází k maximální naměření tvrdosti, poté tvrdost klesá a u oblasti 4 dochází opět k mírnému nárůstu tvrdosti, což odpovídá vzniku trhliny na výtažku. V oblasti 3 dosahuje plech tl. 1,5 mm maximální hodnoty a poté klesá. U tloušťky 1,0 mm se dosáhlo maxima až v oblasti 5, tedy u vrcholku výtažku. Naměřené hodnoty tvrdosti v oblastech 3, 4 a 5 patří mezi nebezpečné místa náchylné k vytvoření trhliny, což odpovídá simulaci i výtažkům.



Obrázek 67. Graf vtiskové tvrdosti H_{IT} – Nakajima

Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. Za brzdovou drážkou v oblasti 2, kde bylo naměřeno maximum, došlo ke zvětšení tvrdosti o téměř 7 % oproti neovlivněné oblasti 1. Tato oblast byla vystavena tvarovým změnám, které mohly ovlivnit mikrostrukturu materiálu a způsobit tak zvýšení tvrdosti.

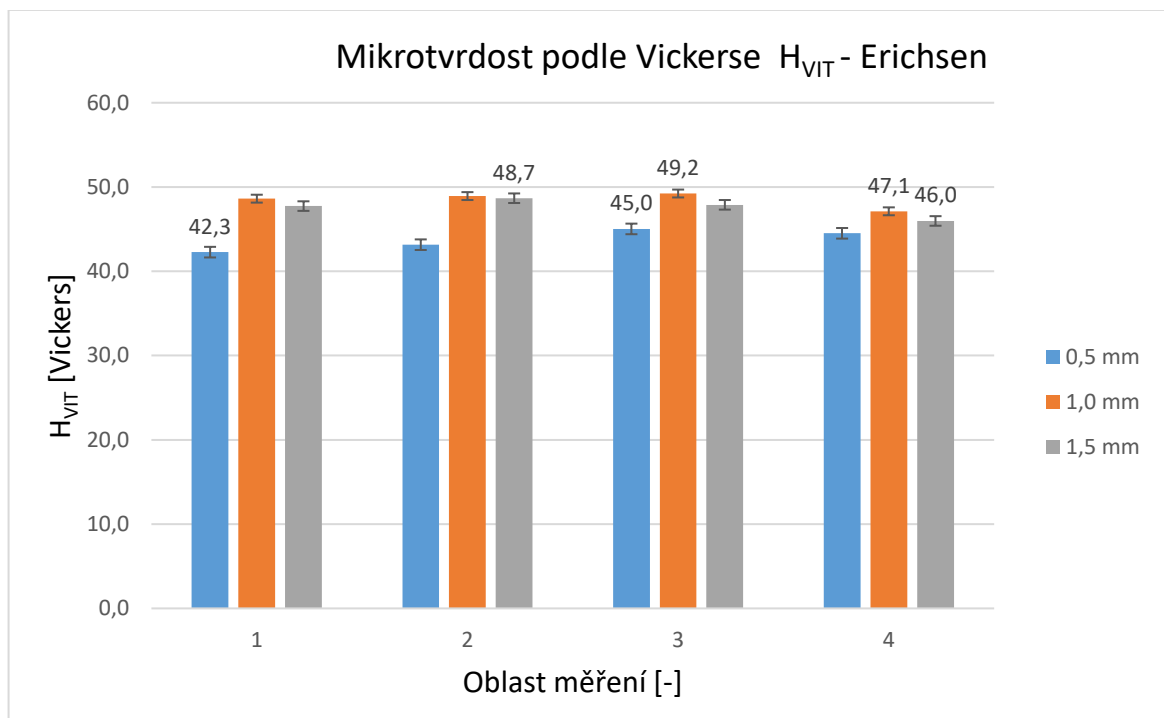
U tloušťky 1,0 mm se dosáhlo maxima až v oblasti 5, tedy u vrcholku výtažku a oproti neovlivněné oblasti plechu stoupla tvrdost skoro o 3 %. To mohlo být způsobeno deformačním zpevněním, které zapříčinilo zvýšení tvrdosti.

U plechu o tloušťce 1,5 mm došlo z neovlivněné oblasti do maxima (oblast 3) ke zvýšení tvrdosti skoro o 3 %. To bylo nejspíše způsobeno během procesu tažení, kdy v této oblasti došlo ke změnám v struktuře, které se projeví zhuštěním struktury, a to vedlo ke zpevnění materiálu a zvýšení tvrdosti.

11.4.2 Mikrotvrdość podle Vickerse H_{VIT}

Erichsen

Průběhy naměřených hodnot se u vtiskové tvrdosti a mikrotvrdości podle Vickerse podobají. U všech oblastí dochází během tažení k nárůstu mikrotvrdości až na oblast 4, kde na vrcholku výtažku dochází k poklesu. Plechy tl. 0,5 mm a 1,0 mm nabývají maxima v oblasti 3 a plech tl. 1,5 mm v oblasti 2. Tato místa odpovídají vzniku trhlin.



Obrázek 68. Graf mikrotvrdości podle Vickerse H_{VIT} – Erichsen

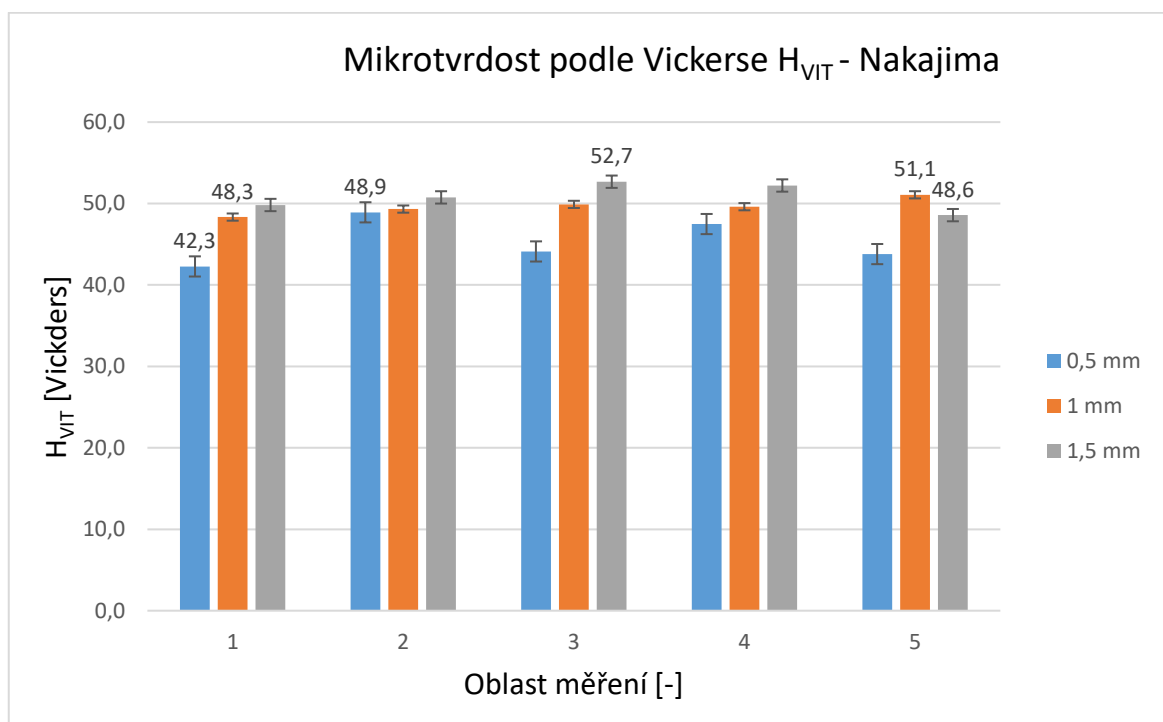
Protože se průběhy vtiskové tvrdosti a mikrotvrdości podle Vickerse podobají, tak i procentuální rozdíly jsou podobné. Největší rozdíl byl opět u plechu o tloušťce 0,5 mm, kde došlo ke zvětšení tvrdosti o 6 % mezi neovlivněnou oblastí a oblastí 3. V této oblasti došlo během tažení ke zpevnění materiálu vlivem vzniklých deformací (zhuštění struktury materiálu), a to mělo za následek zvýšení tvrdosti. Kvůli koncentraci tahového napětí v této oblasti došlo následně ke vzniku trhliny na povrchu výtažku. Simulace potvrdila tuto oblast za nebezpečnou.

V případě plechu o tloušťce 1,0 mm došlo ke snížení tvrdosti o 3 % od neovlivněné oblasti do oblasti 4, kde se nachází vrcholek výtažku. To mohlo být způsobeno menším deformačním zpevněním během tažení.

To samé platilo i u plechu o tl. 1,5 mm, kde došlo také ke snížení tvrdosti v oblasti 4. Rozdíl tvrdosti byl 3,5 %.

Nakajima

Průběhy naměřených hodnot se u vtiskové tvrdosti a mikrotvrdosti podle Vickerse opět podobají. Nárůst mikrotvrdosti nastává až za brzdící drážkou. U tloušťky plechu 0,5 mm zde dochází k maximální naměření mikrotvrdosti. Poté klesá a u oblasti 4 dochází opět k mírnému nárůstu, což odpovídá vzniku trhliny na výtažku. V oblasti 3 dosahuje plech tl. 1,5 mm maximální hodnoty a poté klesá. U tloušťky 1,0 mm se dosáhlo maxima až v oblasti 5, tedy u vrcholku výtažku. Naměřené hodnoty mikrotvrdosti v oblastech 3, 4 a 5 patří mezi nebezpečné místa náchylné k vytvoření trhliny, což odpovídá simulaci i výtažkům.



Obrázek 69. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse H_{VIT} – Nakajima

Největší rozdíl mezi neovlivněnou a nejvíce ovlivněnou oblastí plechu byl dosažen u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 2, kde bylo naměřeno maximum, došlo ke zvýšení tvrdosti téměř o 7 % oproti neovlivněné oblasti 1. Tato oblast byla podrobena tvarovým změnám, které mohly na začátku tažení ovlivnit mikrostrukturu materiálu a způsobit tak zvýšení tvrdosti.

U plechu o tloušťce 1,0 mm byl největší rozdíl dosažen v oblasti 5, tedy u vrcholku výtažku, kde se tvrdost téměř o 3 % zvýšila oproti neovlivněné oblasti plechu. To mohlo být způsobeno deformačním zpevněním, které způsobilo zvýšení tvrdosti.

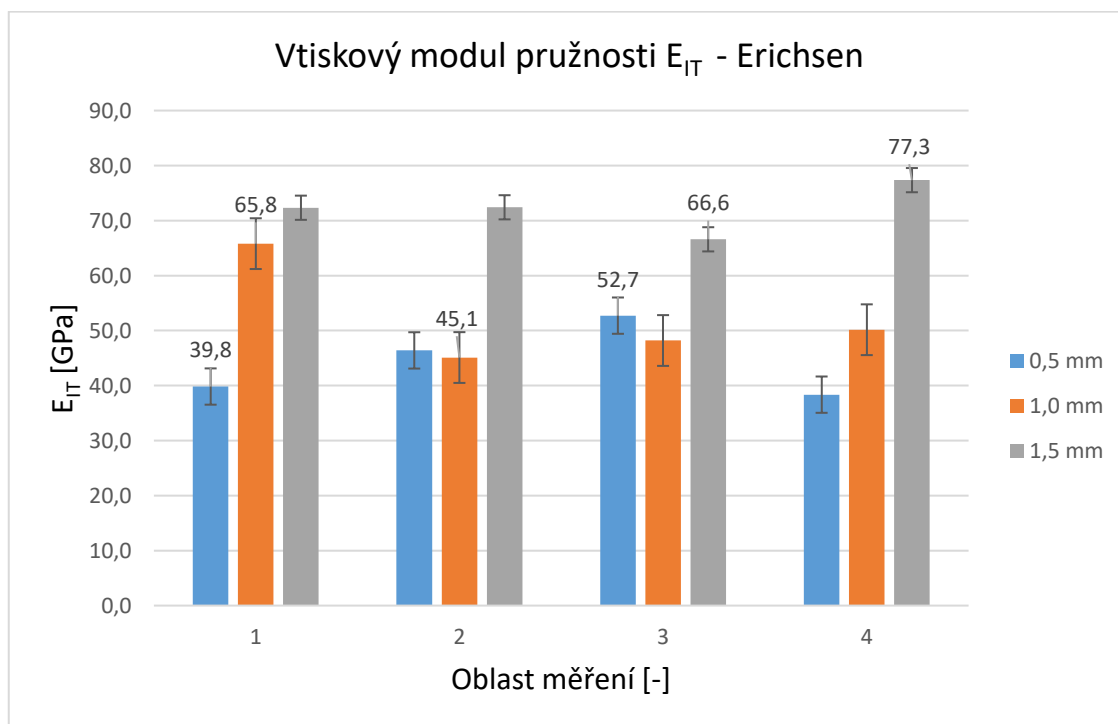
U plechu o tloušťce 1,5 mm se tvrdost téměř o 3 % zvýšila od neovlivněné oblasti po maximum (oblast 3). To pravděpodobně bylo způsobeno procesem tažení, který způsobil změny v mikrostruktuře, došlo ke zhuštění struktury a zpevnění materiálu.

11.4.3 Vtiskový modul pružnosti E_{IT}

Modul pružnosti popisuje, jak materiál reaguje na napětí při deformaci. S rostoucím modulem pružnosti je potřeba více napětí k dosažení stejné deformace. Změna modulu pružnosti závisí na procesu tažení a deformaci materiálu. Modul pružnosti klesá s nárůstem deformace, což může způsobit například změnu tloušťky stěny výsledného výrobku.

Erichsen

U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k růstu vtiskového modulu až do maxima v oblasti 3. Plech tl. 1,0 mm dosahuje maxima již v 1 oblasti a poté skokově dosáhl minima, což ukazuje ztenčení plechu. Od minima dochází k mírnému nárůstu až po oblast 4. V případě plechu tl. 1,5 mm bylo naměřeno minimum v oblasti 3 a maximum v oblasti 4, což mělo opět za následek ztenčení stěny.



Obrázek 70. Graf vtiskového modulu pružnosti – Erichsen

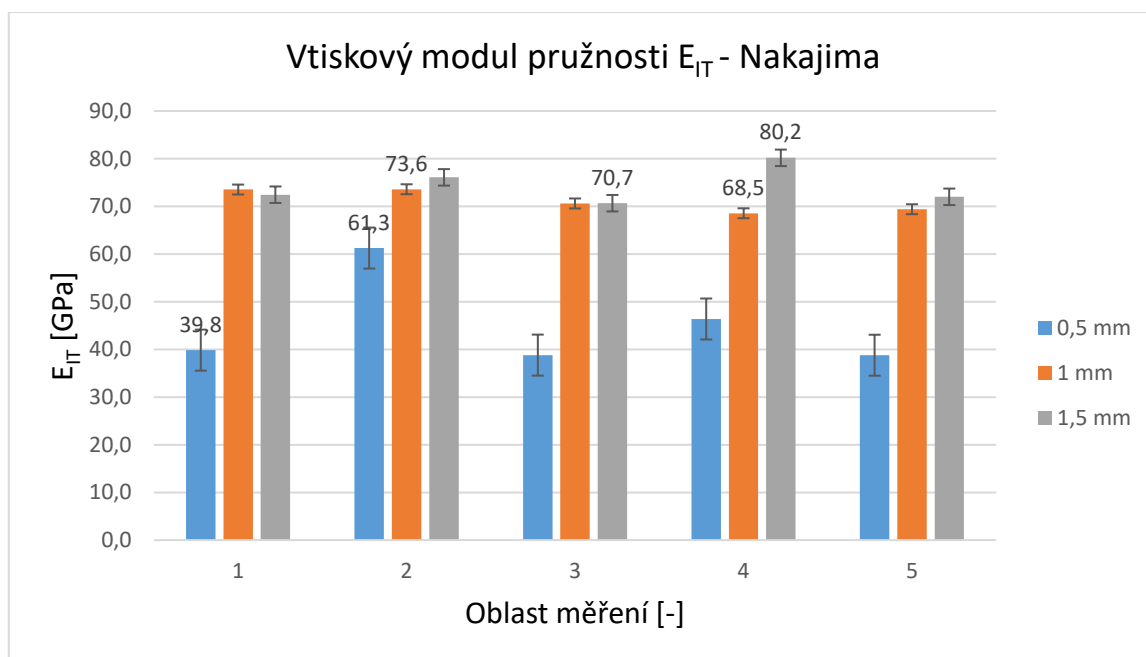
Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 1,0 mm. Rozdíl mezi modulem pružnosti u neovlivněné oblasti plechu a nejvíce ovlivněné oblasti plechu byl skoro 32 %. Tento pokles byl způsoben procesem tažení, který ovlivnil mikrostrukturu materiálu a mohlo dojít ke ztenčení plechu.

U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě modul pružnosti vzrostl o 25 %. Tato oblast popisuje průběh tažení kopule. Simulace označila tuto oblast za kritickou, tudíž zde může vzniknout trhlinka.

V případě plechu o tloušťce 1,5 mm nedošlo k tak velkému rozdílu neovlivněné a nejvíce ovlivněné oblasti jak u předchozích plechů. Nejvíce ovlivněná oblast 3 klesla skoro o 8 %. Simulace označila tuto oblast za rizikovou. To mohlo být důsledkem změny ve struktuře materiálu způsobené procesem tažení.

Nakajima

U plechu tl. 0,5 mm se dosáhlo maxima modulu pružnosti v oblasti 2 (za brzdící drážkou), poté došlo ještě k nárůstu v oblasti 4, jinak se hodnota modulu pružnosti držela skoro na stejné hodnotě. U plechu tl. 1,0 mm se dosáhlo maxima v oblasti 2, poté docházelo k poklesu modulu pružnosti. Oblasti u tohoto plechu dosahovali skoro stejných hodnot. K nárůstu modulu pružnosti za brzdící drážkou došlo i u plechu tl. 1,5 mm a maxima se dosáhlo ve 4 oblasti.



Obrázek 71. Graf vtiskového modulu pružnosti – Nakajima

Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 2, kde bylo naměřeno maximum, došlo ke zvýšení modulu pružnosti téměř o 18 % oproti neovlivněné oblasti 1. Tato oblast byla podrobena tvarovým změnám, které mohly při tažení ovlivnit mikrostrukturu materiálu. Tuto změnu mohla ovlivnit i geometrie brzdící drážky.

U plechu o tloušťce 1,0 mm byl největší rozdíl dosažen v oblasti 4, kde došlo k poklesu modulu pružnosti téměř o 3,5 %. Toto místo je podle simulace označené za rizikové a mohlo zde dojít ke koncentraci většího napětí, které následně způsobilo trhlinu ve výtažku.

Stejný případ nastal i u plechu o tloušťce 1,0 mm. Největší rozdíl byl dosažen také v oblasti 4. Zde došlo k poklesu modulu pružnosti téměř o 5 %. Toto místo je podle simulace označené za rizikové a mohlo zde dojít ke koncentraci většího napětí, které následně způsobilo trhlinu ve výtažku.

11.4.4 Elastická práce W_{ELAST}

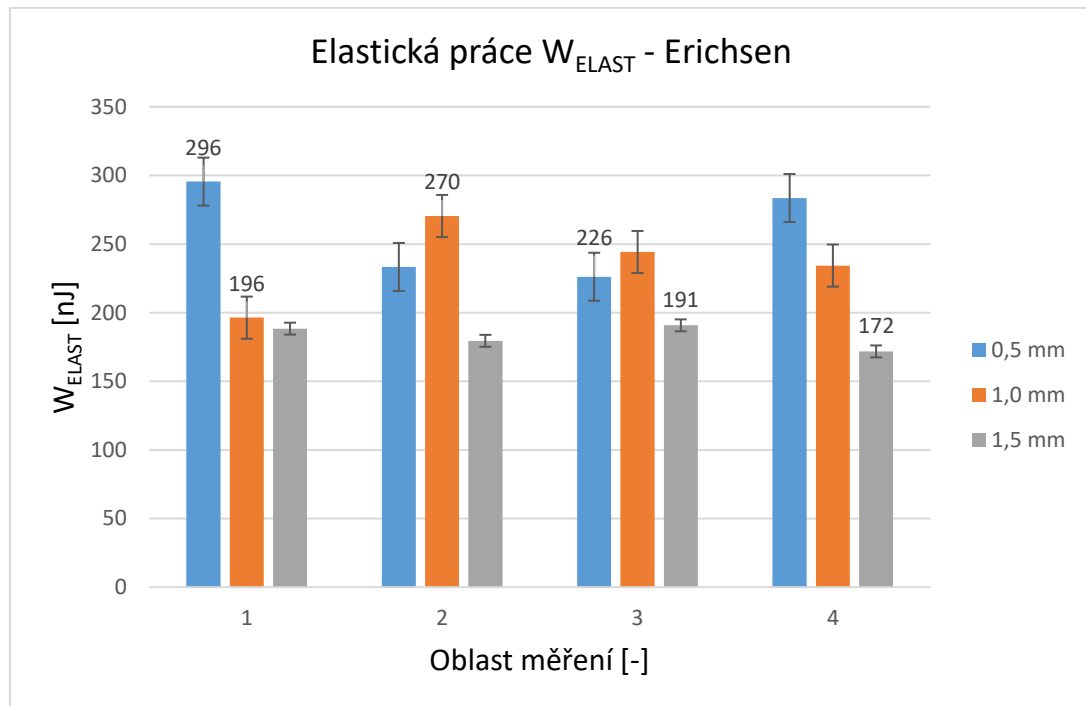
Elastická práce se využívá k deformaci materiálu do určitého stupně, přičemž se materiál stále chová elasticky a může se vrátit do původního tvaru po uvolnění napětí tudíž po odlehčení zatížení zmizí.

Erichsen

U plechu tloušťky 0,5 mm došlo ke zvýšení elastické práce na začátku tažení a na konci, tedy oblast 1 a 4. Pokles elastické práce v oblasti 2 a 3 naznačuje, že materiál postupně přechází do plastické deformace.

V případě plechu tl. 1,0 mm došlo k nárůstu v 2 oblasti, poté došlo k poklesu. To opět naznačuje, že materiál postupně přechází do plastické deformace.

Elastická práce u plechu tl. 1,5 mm nabývá nejmenších hodnot. Minima elastické práce bylo dosaženo v oblasti 4 (na vrcholku výtažku), což může být způsobeno vyšší plastickou deformací v této oblasti. Maximum bylo naměřeno v oblasti 3, kde mohlo dojít ke koncentraci deformace. Oblast 3 a 4 patří podle simulace mezi rizikové a mohly mít za následek vznik trhliny.



Obrázek 72. Graf elastické práce – Erichsen

Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 1,0 mm. V oblasti 2 došlo ke zvýšení elastické práce o 27 % oproti neovlivněné oblasti 1. Toto chování naznačuje, že se materiál na začátku tažení (oblast 2) dobře přizpůsobuje deformaci a více se deformuje elasticky než plasticky.

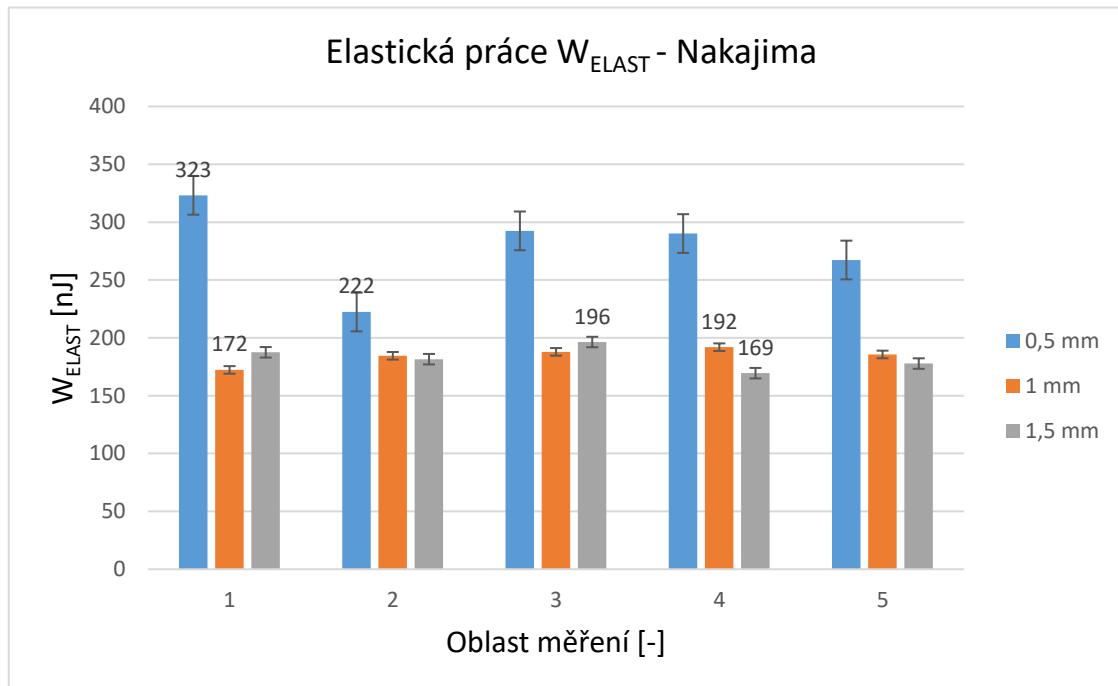
U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě se elastická práce snížila skoro o 24 %. Materiál se na začátku a v průběhu tažení chová více plasticky, a to je naznačeno poklesem elastické práce v oblasti 2 a 3. Následně dochází v oblasti 4 (u vrcholku výtažku) k nárůstu elastické práce, což může být v důsledku relaxace napětí.

V případě plechu o tloušťce 1,5 mm nedošlo k tak velkému rozdílu neovlivněné a nejvíce ovlivněné oblasti jak u předchozích plechů. Největší rozdíl byl mezi oblastí 1 a 4. Tato oblast klesla o 8,5 %.

Nakajima

Plech o tloušťce 0,5 mm dosáhl maxima v 1 oblasti. Poté v oblasti 2 (za drážkou) došlo k poklesu elastické práce, což může značit výskyt vyšší deformace. Následně v oblasti 3 došlo ke skokovému nárůstu. Od oblasti 4 došlo k poklesu elastické práce až do oblasti 5. Materiál se v těchto oblastech začal deformovat více plasticky. Oproti tomu u plechů o tl.

1,0 mm a 1,5 mm se elastická práce držela na podobných hodnotách. U obou plechů jsou rizikové oblasti 3 a 4 a byly tu naměřeny nejvyšší hodnoty elastické práce.



Obrázek 73. Graf elastické práce – Nakajima

Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 2 byla o skoro 16 % menší elastická práce. Tato oblast byla podrobena tvarovým změnám, které mohly při tažení ovlivnit mikrostrukturu materiálu. Tuto změnu mohla ovlivnit i geometrie brzdící drážky.

U plechu o tloušťce 1,0 mm byl největší rozdíl dosažen v oblasti 4, kde došlo ke zvětšení elastické práce o více než 5 %. Toto místo je podle simulace označené za rizikové a mohlo zde dojít ke koncentraci většího napětí, které následně způsobilo trhlinu ve výtažku.

Stejný případ nastal i u plechu o tloušťce 1,5 mm. Největší rozdíl byl dosažen také v oblasti 4. Zde došlo k poklesu elastické práce také o 5 %. Toto místo je podle simulace také označeno za rizikové a mohlo by zde dojít ke koncentraci většího napětí, které by následně způsobilo trhlinu ve výtažku.

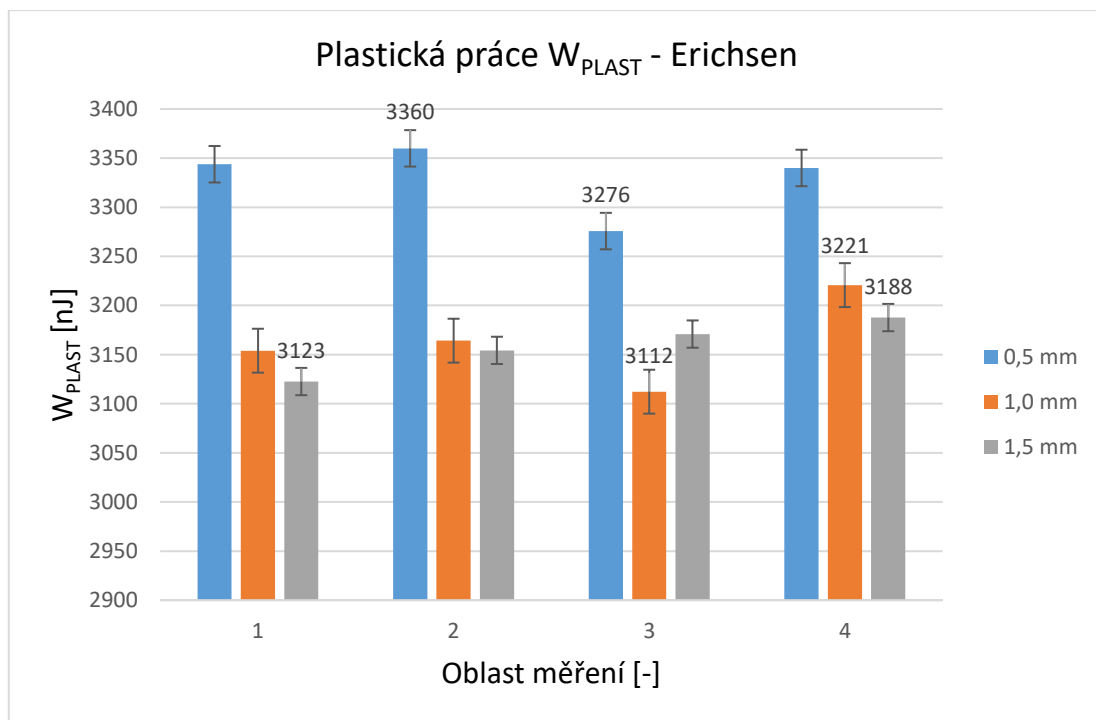
11.4.5 Plastická práce W_{PLAST}

Na rozdíl od elastické práce, plastická práce způsobuje trvalou deformaci materiálu, který již není schopen vrátit se do svého původního tvaru po uvolnění napětí. Plastická práce

ovlivňuje konečný tvar výrobku a je důležitá pro správné plánování a hodnocení efektivity procesu tažení.

Erichsen

Plastická práce se u plechu tl. 0,5 mm pohybovala ve větších hodnotách než u zbylých plechů. Plastická práce nejprve vzrostla na maximum v oblasti 2, poté dosáhla v oblasti 3 minima a následně došlo opět k nárůstu. V těchto oblastech dochází ke koncentraci napětí, a to mohlo způsobit trhlinu ve výtažku. Simulace potvrdila, že tyto oblasti patří mezi kritické. Podobný průběh měl i plech o tl. 1,0 mm s tím rozdílem, že maxima se dosáhlo ve 4 oblasti. V případě plechu o tl. 1,5 dochází k postupnému zvyšování plastické práce směrem k vrcholku výtažku.



Obrázek 74. Graf plastické práce – Erichsen

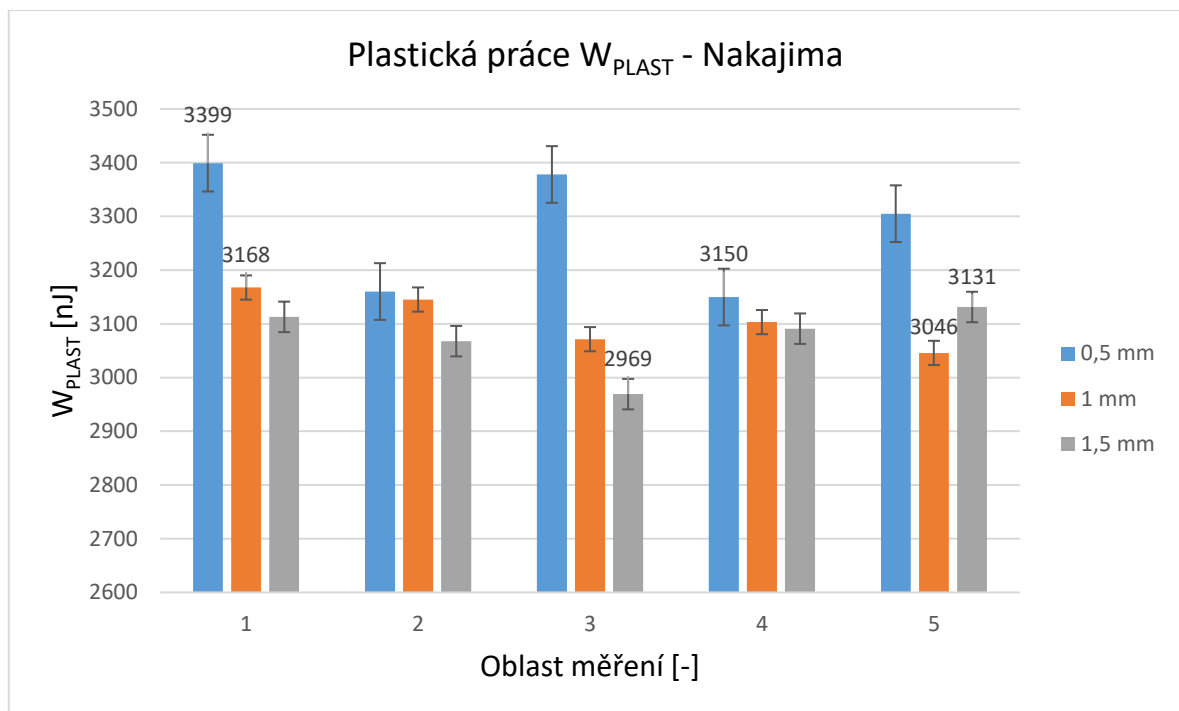
Při porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 1,0 mm. V oblasti 3 došlo ke snížení plastické práce o 2,1 % oproti neovlivněné oblasti 1. To mohlo být způsobeno změnou ve struktuře materiálu.

U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě se plastická práce snížila skoro o 2 %. To znamená, že dochází ke změně v chování materiálu.

V případě plechu o tloušťce 1,5 mm byl největší rozdíl mezi oblastí 1 a 4. V této oblasti došlo ke zvýšení o 2 %.

Nakajima

Pro plech tl. 0,5 mm bylo dosaženo maxima plastické práce na začátku v oblasti 1, poté došlo k poklesu s následným nárůstem v 3 oblasti. Následně došlo opět k poklesu v oblasti 4 a směrem k vrcholku výtažku došlo opět k nárůstu plastické práce. U tloušťky plechu 1,0 mm došlo k postupnému snížení mezi oblastí 1 a 3. Poté nastal mírný nárůst s následným poklesem plastické práce. V případě plechu o tl. 1,5 mm došlo k poklesu plastické práce z oblasti 1 až do oblasti 3. Poté došlo k nárůstu plastické práce až k vrcholku výtažku (oblast 5).



Obrázek 75. Graf plastické práce – Nakajima

Při porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 4 došlo ke snížení plastické práce o 3,7 % oproti neovlivněné oblasti 1. To mohlo být způsobeno změnou ve struktuře materiálu.

U plechu tloušťky 1,0 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 5. V tomto případě se plastická práce snížila skoro o 2 %. To znamená, že dochází ke změně v chování materiálu. V případě plechu o tloušťce 1,5 mm byl největší rozdíl mezi oblastí 1 a 3. V této oblasti došlo ke snížení plastické práce o 2,3 %.

12 DISKUZE VÝSLEDKŮ

Vyhodnocená data ze zařízení BUP 600 jasně ukazují, že u materiálu EN AW-1050A s rostoucí tloušťkou plechu roste i potřebná síla na tažení výtažku, což umožňuje dosažení větší hloubky tahu. Tenčí plechy se sice lépe táhnou a vyžadují menší síly, ale zároveň může dojít k dřívějšímu prasknutí v materiálu. To je zapříčiněno vyšší flexibilitou, větším poměrem tloušťky k průměru ohybu a homogenitě materiálu.

Výsledky simulace ukázaly rizikové oblasti směrem k vrcholu výtažku, což bylo potvrzeno i ve skutečném výtažku, kde se objevovaly trhliny v horní části. Dále byla tato problematika detailněji zkoumána prostřednictvím měření mechanických vlastností. Tloušťka plechu a zvolená metoda tažení měly největší vliv na průběh grafů mechanických vlastností. Při použití metody podle Nakajima s větším tažníkem a brzdou drážkou bylo pozorováno odlišné chování při tažení ve srovnání s metodou podle Erichsena.

Hodnoty vtiskové tvrdosti H_{IT} a mikrotvrdosti podle Vickerse H_{VIT} se hodnotami lišily, ale průběh naměřených hodnot v grafu se téměř shodoval. U metody podle Erichsena při tloušťce plechu 0,5 mm a 1,0 mm dochází ke stejnému průběhu, kdy tvrdost stoupá až do oblasti 3 a poté klesne. U této oblasti došlo během tažení ke zpevnění materiálu vlivem změnou struktury, a to mělo za následek zvýšení tvrdosti. Oblast 3 odpovídá nebezpečí vzniku trhliny a shoduje se tak s reálným výtažkem. V případě plechu tloušťky 1,5 mm dochází k maximu tvrdosti již v oblasti 2 s následným poklesem. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu s nejvíce ovlivněnou oblastí plechu se výsledky lišily. Největší rozdíl byl u plechu o tloušťce 0,5 mm, kdy v oblasti 3 tvrdost vzrostla o 6 %. V případě plechu tloušťky 1,0 mm došlo ke snížení tvrdosti o 3 % v oblasti 4. To samé platilo i u plechu tloušťky 1,5 mm, kde došlo také ke snížení tvrdosti v oblasti 4 s tím rozdílem, že to bylo o 4 %.

U metody podle Nakajima dochází ke změně tvrdosti až za brzdící drážkou (oblast 2). Tato oblast byla vystavena tvarovým změnám, které mohly ovlivnit mikrostrukturu materiálu a způsobit tak zvýšení tvrdosti. U tloušťky plechu 0,5 mm zde dochází k maximální naměření tvrdosti, poté tvrdost klesá a u oblasti 4 dochází opět k mírnému nárůstu tvrdosti, což odpovídá vzniku trhliny na výtažku. Tvrdost plechu tloušťky 1,5 mm postupně stoupá až do oblasti 3, kde nabývá maxima a poté klesá. U tloušťky 1,0 mm se dosáhlo maxima až v oblasti 5, tedy u vrcholku výtažku. Oproti metodě podle Erichsena dochází k větším změnám tvrdosti v průběhu tažení. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu

s nejvíce ovlivněnou oblastí plechu se výsledky lišily. Největší rozdíl byl opět u plechu o tloušťce 0,5 mm, kdy v oblasti 2 tvrdost vzrostla o téměř 7 %. V případě plechu tloušťky 1,0 mm došlo ke zvýšení tvrdosti o 3 % v oblasti 5. U plechu došlo ke zvýšení tvrdosti v oblasti 3 skoro o 3 %.

U vtiskového modulu pružnosti E_{IT} dochází opět ke změně mechanických vlastností v průběhu tažení. U metody podle Erichsena pro plech tloušťky 0,5 mm došlo k postupnému nárůstu modulu pružnosti až do oblasti 3 s následným poklesem na minimum do oblasti 4. Plech tloušťky 1,0 mm měl maximum modulu pružnosti již na začátku tažení, poté klesl na minimum v oblasti 2 s následným nárůstem k vrcholu výtažku. V případě plechu tloušťky 1,5 mm se hodnoty v oblasti 1 a 2 pohybovaly skoro na stejné úrovni. V oblasti 3 dosáhl modul pružnosti minima s následným nárůstem maxima v oblasti 4, což odpovídá kritickým místům vzniku trhliny. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti plechu s nejvíce ovlivněnou oblastí plechu se výsledky lišily. Největší rozdíl byl u plechu o tloušťce 1,0 mm. Rozdíl mezi modulem pružnosti u neovlivněné oblasti plechu a nejvíce ovlivněné oblasti plechu byl skoro 32 %. Tento pokles byl způsoben procesem tažení, který ovlivnil mikrostrukturu materiálu a mohlo dojít ke ztenčení plechu. U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě modul pružnosti vzrostl o 25 %. V případě plechu o tloušťce 1,5 mm nedošlo k tak velkému rozdílu neovlivněné a nejvíce ovlivněné oblasti jak u předchozích plechů. Nejvíce ovlivněná oblast 3 klesla skoro o 8 %.

Plech tloušťky 0,5 mm tažený metodou Nakajima dosáhl maxima modulu pružnosti za brzdící drážkou (oblast 2) s následným poklesem na minimum (oblast 3). Tento skok se může projevit prasklinou na výtažku, což simulace neukazuje. V oblasti 4 došlo opět k nárůstu, ale směrem k vrcholku výtažku modul pružnosti klesl. V případě plechu tloušťky 1,0 mm nedochází k tak výrazným skokům, ale opět je maximum dosaženo za brzdící drážkou, i když ta hodnota je skoro stejná jak v oblasti 1. Následně modul pružnosti klesá. I u plechu tloušťky 1,5 mm dojde k nárůstu modulu pružnosti za brzdící drážkou, ale poté v oblasti 3 dojde k poklesu na minimum s následným nárůstem na maximum v oblasti 4. K vrcholku výtažku je následný pokles modulu pružnosti. Tyto skoky v průběhu tažení odpovídají nebezpečným oblastem vzniku trhlin i podle simulace. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 2 došlo ke zvýšení modulu pružnosti téměř o 18 % oproti neovlivněné oblasti 1. Tato oblast byla podrobena tvarovým změnám, které

mohly při tažení ovlivnit mikrostrukturu materiálu. Tuto změnu mohla ovlivnit i geometrie brzdící drážky. U plechu o tloušťce 1,0 mm byl největší rozdíl dosažen v oblasti 4, kde došlo k poklesu modulu pružnosti téměř o 3,5 %. Stejný případ nastal i u plechu o tloušťce 1,0 mm. Největší rozdíl byl dosažen také v oblasti 4, kde došlo k poklesu modulu pružnosti téměř o 5 %. Tyto místa jsou podle simulace označena za rizikové a mohlo by zde dojít ke koncentraci většího napětí, které by následně způsobily trhlinu ve výtažku.

Výsledky elastické práce W_{ELAST} tažené metodou podle Erichsena nastalo k výraznějším nárůstům a poklesům elastické práce. U plechu tloušťky 0,5 mm došlo k dosažení maxima již v oblasti 1. Poté elastická práce klesala až na minimum do oblasti 3. To naznačovalo, že materiál postupně přecházel do plastické deformace. Směrem k vrcholku výtažku (oblast 4) nastal nárůst elastické práce. V případě plechu tl. 1,0 mm došlo k nárůstu v 2 oblasti, poté došlo k poklesu. Elastická práce u plechu tl. 1,5 mm nabývá nejmenších hodnot. Maxima elastické práce dosahuje v oblasti 3 a v oblasti 4 minima. Oblast 3 a 4 patří podle simulace mezi rizikové a mohly mít za následek vznik trhliny. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 1,0 mm. V oblasti 2 došlo ke zvýšení elastické práce o 27 %. Toto chování naznačuje, že se materiál na začátku tažení (oblast 2) dobře přizpůsobuje deformaci a více se deformuje elasticky než plasticky. U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě se elastická práce snížila skoro o 24 %. Materiál se na začátku a v průběhu tažení chová více plasticky, a to je naznačeno poklesem elastické práce v oblasti 2 a 3. V případě plechu o tloušťce 1,5 mm nedošlo k tak velkému rozdílu jak u předchozích plechů. Největší rozdíl byl mezi oblastí 1 a 4. Tato oblast klesla o 8,5 %.

V případě tažení podle Nakajima byly největší rozdíly zaznamenány u plechu tloušťky 0,5 mm. Kdy v 1 oblasti dosáhl maxima s následným poklesem na minimum (oblast 2 za brzdící drážkou). V oblasti 3 dojde opět k nárůstu elastické práce a poté již klesá k vrcholku výtažku. Elastická práce u plechu o tloušťce 1,0 mm mírně stoupala až do oblasti 4. Směrem k vrcholku výtažku pak došlo k poklesu. Plech o tloušťce 1,5 mm dosáhl maxima elastické práce ve 3 oblasti s následným poklesem směrem k vrcholku výtažku. Při procentuálním porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 2 byla o skoro 16 % menší elastická práce. Tato oblast byla podrobena tvarovým změnám, které mohly při tažení ovlivnit mikrostrukturu materiálu. Tuto změnu mohla ovlivnit i geometrie brzdící drážky. U plechu o tloušťce 1,0 mm byl největší rozdíl dosažen v oblasti 4, kde došlo ke zvětšení elastické

práce o více než 5 %. Stejný případ nastal i u plechu o tloušťce 1,5 mm. Největší rozdíl byl dosažen také v oblasti 4. Zde došlo k poklesu elastické práce také o 5 %. Tyto místa jsou podle simulace označeny za rizikové a mohlo by zde dojít ke koncentraci většího napětí, které by následně způsobilo trhlinu ve výtažku.

Výsledky plastické práce W_{PLAST} dosahují nejvyšších naměřených hodnot u plechu tloušťky 0,5 mm. U metody podle Erichsena je dosaženo maxima v oblasti 2, s následným poklesem na minimum. Poté došlo ještě k nárůstu plastické práce k vrcholu výtažku. V těchto oblastech dochází ke koncentraci napětí, a to mohlo způsobit trhlinu ve výtažku. Podobný průběh měl i plech o tl. 1,0 mm s tím rozdílem, že maxima se dosáhlo v 4 oblasti. V případě plechu o tl. 1,5 mm dochází k postupnému zvyšování plastické práce směrem k vrcholku výtažku. Při porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 1,0 mm. V oblasti 3 došlo ke snížení plastické práce o 2,1 % oproti neovlivněné oblasti 1. To mohlo být způsobeno změnou ve struktuře materiálu. U plechu tloušťky 0,5 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 3. V tomto případě se plastická práce snížila skoro o 2 %. To znamená, že dochází ke změně v chování materiálu. V případě plechu o tloušťce 1,5 mm byl největší rozdíl mezi oblastí 1 a 4. V této oblasti došlo ke zvýšení o 2 %.

Výsledky plastické práce tažené podle Nakajima bylo opět dosaženo maximálních hodnot u plechu o tloušťce 0,5 mm. Maxima plastické práce bylo dosaženo již na začátku, poté došlo k poklesu s následným nárůstem v 3 oblasti. Následně došlo opět k poklesu v oblasti 4 a směrem k vrcholku výtažku došlo opět k nárůstu plastické práce. Tyto skoky mohou způsobit vznik trhliny během tažení. U tloušťky plechu 1,0 mm došlo k postupnému snížení mezi oblastí 1 a 3. Poté nastal mírný nárůst s následným poklesem plastické práce. V případě plechu o tl. 1,5 mm došlo k poklesu plastické práce z oblasti 1 až do oblasti 3. Poté došlo k nárůstu plastické práce až k vrcholku výtažku (oblast 5). Celkově lze usoudit, že u obou metod s rostoucí tloušťkou plechu dochází ke snížení plastické práce. Při porovnání neovlivněné oblasti 1 a nejvíce ovlivněné oblasti plechu bylo dosaženo největšího rozdílu u plechu o tloušťce 0,5 mm. V oblasti 4 došlo ke snížení plastické práce o 3,7 % oproti neovlivněné oblasti 1. To mohlo být způsobeno změnou ve struktuře materiálu. U plechu tloušťky 1,0 mm dochází k největšímu rozdílu mezi oblastí 1 a 5. V tomto případě se plastická práce snížila skoro o 2 %. V případě plechu o tloušťce 1,5 mm byl největší rozdíl mezi oblastí 1 a 3. V této oblasti došlo ke snížení plastické práce o 2,3 %.

ZÁVĚR

V úvodu teoretické části byly nejdříve popsány druhy hliníkových plechů, následně se práce zabývala tvářením se zaměřením na technologii hlubokého tažení. Poté byly rozebrány mechanické vlastnosti a jejich zkoušky. Na to navazovaly technologické zkoušky. V poslední řadě byly popsány simulace hlubokého tažení.

V praktické části bylo cílem otestovat tažnost vybraného hliníkového plechu, konkrétně EN AW-1050A a zaznamenat změnu jeho mechanických vlastností během tažení. Vybraný plech byl zvolen ve třech různých tloušťkách a to 0,5 mm, 1,0 mm a 1,5 mm. Zkoušky hlubokého tažení byly provedeny podle metod Erichsena a Nakajima s různě velkými tažníky. Pro metodu podle Erichsena byl zvolen tažník o průměru 18 mm a pro metodu podle Nakajima byl zvolen tažník o průměru 60 mm. Proces tažení proběhl na zařízení BUP 600. Výsledek tažení byl získán ze závislosti síly tažení na hloubce tažení, z kterých lze vidět, jak volba tloušťky materiálu plechu ovlivnila potřebnou sílu k vytažení vzorků.

Dále byly vytvořeny simulace hlubokého tažení v programu AutoForm R8 pro porovnání se vzorky vytaženými podle metod Erichsena a Nakajima. Simulace byly nastaveny a popsány podle reálného procesu tažení. Z vytažených vzorků byly vyřezány segmenty, které byly následně zalisovány a broušeny. Na těchto vzorcích byly měřeny oblasti, ve kterých docházelo ke změnám mechanických vlastností během tažení. Pro metodu podle Erichsena byla nejprve zvolena neovlivněná oblast hlubokého tažení. Poté oblast počátku hlubokého tažení, oblast v průběhu hlubokého tažení a oblast na vrcholku výtažku. Pro metodu Nakajima byla zvolena oblast před brzdící drážkou, za brzdící drážkou, spodní oblast průběhu hlubokého tažení, oblast průběhu hlubokého tažení a vrchol hlubokého tažení.

V poslední řadě proběhlo měření mechanických vlastností v jednotlivých oblastech vzorků. Mechanické vlastnosti byly měřeny na zařízení Micro-Combi Tester od firmy CSM. Mezi vyhodnocené výsledky patřily vtisková tvrdost H_{IT} , mikrotvrdost podle Vickerse H_{VIT} , vtiskový modul pružnosti E_{IT} , elastická práce W_{ELAST} a plastická práce W_{PLAST} . Výsledky vtiskové tvrdosti H_{IT} a mikrotvrdosti podle Vickerse H_{VIT} dosahovaly podobného průběhu. V nebezpečných oblastech vzniku trhliny nabývaly maximálních hodnot, což potvrdila i simulace. Modul pružnosti E_{IT} naopak dosahoval nižších hodnot a v závislosti na této změně se měnil podíl elastické práce W_{ELAST} a plastické práce W_{PLAST} . Změna mechanických vlastností proběhla při každé tloušťce plechu, a i změně metody. Výsledky simulací z většiny případů potvrdily reálný výsledek.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] THE PIPING MART, *8 Types of aluminum sheets and their uses*. 2023, [online]. [cit. 20.2.2024] Dostupné z: <https://blog.thepipingmart.com/metals/8-types-of-aluminum-sheets-and-their-uses/>
- [2] DVOŘÁK, Milan; GAJDOŠ, František a NOVOTNÝ, Karel, 2013. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM. ISBN 978-80-214-4747-9.
- [3] RS GROUP, [online]. [cit. 7.3.2024] Dostupné z: <https://uk.rs-online.com/web/content/discovery/ideas-and-advice/aluminium-sheets-guide>
- [4] AALUMINUM, [online]. [cit. 7.3.2024] Dostupné z: <https://aaluminum.com/blog/how-aluminum-sheets-are-made-and-their-various-uses/>
- [5] TOTAL MATERIA, [online]. [cit. 7.3.2024] Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/page.aspx?ID=AluminumGrades&LN=CZ>
- [6] LIAN, Eric, *Yubisteel*, [online]. 2023 [cit. 20.2.2024] Dostupné z: <https://www.yubisteel.com/difference-between-aluminum-sheet-and-aluminum-alloy-sheet/>
- [7] HLUCHÝ, Miroslav a KOLOUCH, Jan, 2007. *Strojírenská technologie 1*. 4., rev. vyd. Praha: Scientia. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [8] MACHEK, Václav, 2015. *Kovové materiály 4: výroba a zpracování ocelí a litin*. V Praze: České vysoké učení technické. ISBN 978-80-01-05686-8.
- [9] NOVOTNÝ, Jiljí, 2006. *Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy)*, Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT. ISBN 8001023516.
- [10] LENFELD, Petr. *Technologie II, 1. část, (Tváření kovů)*. Technická univerzita Liberec, 2005, 110 s. ISBN 80-7372-020-5
- [11] DANCHENKO V., *Metal Forming, Dnepropetrovsk*, 2007, 183 s. ISBN 996-525-716-1
- [12] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. 225 s. ISBN 80-214-2374-9.

- [13] VAKBERG, Henry S., 2006. Applied Metal Forming: Including FEM Analysis. Cambridge University Press, 465. ISBN 0521518237
- [14] FU, Ming Wang, 2017. Design and Development of Metal-Forming Processes and Products Aided by Finite Element Simulation. Engineering Materials and Processes. Imprint: Springer. ISBN 9783319464640.
- [15] HLUCHÝ, Miroslav; KOLOUCH, Jan a PAŇÁK, Rudolf, 2001. Strojírenská technologie 2. 2., upr. vyd. Praha: Scientia. ISBN 80-7183-244-8.
- [16] KURCIK, Jan. Tváření. Techstroj [online]. 2012 [cit. 20.2.2024]. Dostupné z: <http://techstroj.g6.cz/T/T06.pdf>
- [17] Smith, John. Open vs. Closed Die Forging. [online] 2021 IQS Directory, [cit. 20.2.2024]. Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/forging/open-vs-closed-die.html>
- [18] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA, 2012. Sheet metal forming. Materials Park, Oh: ASM International. ISBN 1615038426.
- [19] BOLJANOVIC, Vukota, [2014]. Sheet metal forming processes and die design. Second edition. South Norwalk, CT: Industrial Press. ISBN 9780831134921.
- [20] HINGOLE, R.S, 2015. Advances in metal forming: Expert system for metal forming. Springer series in materials science, 206 s, Berlin. ISBN: 978-3-662-44496-2.
- [21] OBERG, Erik et al., BRENGELMAN, Laura, ed., 2020. *Machinery's handbook*. 31st edition. South Norwalk, Connecticut: Industrial Press. ISBN 978-0-8311-3731-1.
- [22] KOC, M., & ÖZEL, T. 2020. Modern Manufacturing Processes. John Wiley & Sons. ISBN 978-1-11807-192-2
- [23] DEMERI M. Y., Advanced high-strength steels: science, technology, and applications, ASM international 2013.
- [24] AUTOFORM, Drawbeads [online]. [cit. 25.3.2024] Dostupné z: <https://www.autoform.com/en/glossary/drawbeads/>

- [25] Editor Luc LAPERRIÈRE, editor Gunther REINHART. *CIRP Encyclopedia of production engineering*, 2014. Berlin: Springer reference. ISBN 978-3-642-20616-0.
- [26] KOTOUČ, Jiří, 1993. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické. ISBN 80-01-01003-1.
- [27] MACHEK, Václav. *Kovové materiály 2: vlastnosti a zkoušení kovových materiálů*. V Praze: České vysoké učení technické, 2014, 139 s. ISBN 9788001055274.
- [28] HERRMANN, Konrad. *Hardness testing: Principles and applications*. Materials park, Ohio: ASM international 2011. 255 s. ISBN 9781615038473
- [29] DOLEŽAL, P.; PACAL, B. *Hodnocení mikrotvrdosti struktur materiálů*. VUT, Brno: 2007, 41 s.
- [30] WALKER, H. Fred, et al. *The certified quality inspector handbook*. 3rd ed., ASQ Quality press, 2019. 314 s. ISBN 9780873899819.
- [31] OBERG, Erik, et al. *Machinery's Handbook (31st edition)*. Industrial Press, 2020. ISBN 978-0-8311-3731-1
- [32] CAMPBELL, F.C. *Inspection of Metals: Understanding the Basics*. ASM International, 2013. ISBN 978-1-62708-000-2
- [33] VIJAYA, A. SANAPALA, Samhith, K.J. ARVIND, V. DARSHAN. *Vision based formability testing of sheet metal using portable Erichsen cupping tester* [online]. 2022, [cit. 10.4.2024] ISSN 2214-7853 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.08.397>
- [34] TOMÁŠ, Miroslav. KULYA, J.M. KOKARDA, Vladimír. *Formability Evaluation and Strain Distribution at the Limit Dome Height Test of Dual-Phase Steel* [online]. 2023, [cit. 15.4.2024] ISSN 1335-2393 Dostupné z: <https://doi.org/10.21496/ams.2023.031>
- [35] SHAO, Z. BAI, Q. LI, N. et al. *Experimental Investigation of Forming Limit Curves and Deformation Features in Warm Forming of an Aluminium Alloy*. [online]. 2018, [cit. 15.4.2024] ISSN 0924-0136 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2018.11.042>

- [36] A.C.S Reddy, S. Rajesham, P.R. Reddy, A.C. Umamaheswar. *Formability: A review on different sheet metal tests for formability*. [online]. 2020, [cit. 15.4.2024] ISSN 17578981 Dostupné z: <https://doi.org/10.1063/5.0019536>
- [37] HOSFORD, William F. a Robert M. CADDELL, 2011. *Metal forming: mechanics and metallurgy*. 4th ed. Cambridge: Cambridge University Press. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [38] PATEL, S. Kalpesh. PATEL, K. Mehul. PATEL, B. Jitendra. *Role of simulation in deep drawn cylindrical part*. [online]. 2016, [cit. 15.4.2024] ISSN 2321-0613 Dostupné z: https://www.academia.edu/20049928/Role_of_Simulation_in_Deep_Drawn_Cylindrical_Part
- [39] PETRMICHL, Rudolf. *Počítačová simulace tváření plechů* [online]. MM Průmyslové spektrum, 2001 [cit. 15.4.2024]. Dostupné <https://www.mmspektrum.com/clanek/pocitacova-simulace-tvareni-plechu>
- [40] 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), 12981303 [cit. 15.4.2024]. ISSN 02613069. Dostupné z: [doi:10.1016/j.matdes.2006.01.026](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.01.026)
- [41] MACHÁLEK, Jakub, Radek ČADA a Barbora FRODLOVÁ. *Simulace procesů plošného tváření v softwaru PAM-STAMP 2G*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava. Učební text předmětu „Tvářitelnost materiálu a nekonvenční metody ve tváření“, Ostrava 2012, 120 s. ISBN 978-80-248-2715-5
- [42] ČSN EN 573-3+A1, 2023. *Hliník a slitiny hliníku – Chemické složení a druhy tvářených výrobků: Část 3: Chemické složení a druhy výrobků*. Český normalizační institut.
- [43] ČSN EN 485-2+A1, 2019. *Hliník a slitiny hliníku – Plechy, pásy a desky: Část 2: Mechanické vlastnosti*. Česká agentura pro standardizaci.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

ČSN	Česká státní norma	
EN	Evropská norma	
F	Zatěžující síla	[N]
Fe	Železo	
Al	Hliník	
Cu	Měď	
Mn	Mangan	
Si	Křemík	
Mg	Hořčík	
Zn	Zinek	
HV	Tvrдость podle Vickerse	[MPa]
HB	Tvrдость podle Brinella	[MPa]
HRC	Tvrдость podle Rockwella	[MPa]
°C	Stupeň Celsia	
π	Ludolfovo číslo Pi	[-]
R _m	Pevnost v tahu	[MPa]
H _{IT}	Vtisková tvrдость	[MPa]
H _{VIT}	Mikrotvrдость podle Vickerse	[MPa]
E _{IT}	Vtiskový modul pružnosti	[MPa]
W _{ELAST}	Elastická zpětná práce vnikacího procesu	[nJ]
W _{PLAST}	Plastická deformace práce vnikacího procesu	[nJ]

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. a) běhounový (protiskluzový) plech b) perforovaný plech c) eloxovaný plech [3]	13
Obrázek 2. Hlavní legující prvky v hliníku a typ slitiny [7]	13
Obrázek 3. Číselné označování hliníku a slitiny hliníku [3]	14
Obrázek 4. Typy mřížek některých kovů a) krychlová plošně středěná mřížka, b) krychlová prostorově středěná mřížka, c) šesterečná (hexagonální) mřížka [11]	19
Obrázek 5. Mechanismy plastické deformace: a) sklouznutí, b) dvojčatění [11]	20
Obrázek 6. Schéma pružné a trvalé deformace [10]	21
Obrázek 7. Rozdělení tvářecích procesů podle teploty [12]	22
Obrázek 8. Změna tvaru zrn tvářením a) zrna před tvářením, b) zrna po tvářením [15]	23
Obrázek 9. Oblast tvářecí teploty [16]	23
Obrázek 10. Základní operace při ručním kování [16]	25
Obrázek 11. Zápustkové kování [17]	26
Obrázek 12. Princip válcování [7]	26
Obrázek 13. a) podélné, b) příčné, c) kosé válcování [10]	27
Obrázek 14. Dopředné protlačování plného kruhového profilu 1 - materiál, 2 - průtlačnice, 3 - průtlačník pohyblivé průtlačnice [8]	27
Obrázek 15. Průběh stříhání s normální střížnou vůlí [12]	29
Obrázek 16. Průběh napětí a posunutí neutrální osy [10]	30
Obrázek 17. Odpružení materiálu po ohybu [15]	30
Obrázek 18. Rovnání plechu válcováním [19]	31
Obrázek 19. Schematické znázornění procesu hlubokého tažení	32
Obrázek 20. Schémata tažných operací	33
Obrázek 21. Přemístění materiálu při tažení [9]	34
Obrázek 22. Vznik vln na výtažku [19]	35
Obrázek 23. Vznik lomu při hlubokém tažení: a) způsobený příliš malým poloměrem tažnice, b) způsobený příliš malým poloměrem tažníku [19]	35
Obrázek 24. Schéma napjatosti a deformací při hlubokém tažení s přidržovačem [9]	36
Obrázek 25. Schéma tažení plechu s přidržovačem a brzdící drážkou. F_b – síla přidržovače, F_p – síla tažníku, F_r – omezující síla [23]	38
Obrázek 26. Typy brzdících drážek. a) běžná brzdící drážka, b) brzdící drážka s výběhem pro vysokopevnostní oceli, c) uzamčená brzdící drážka [23]	39
Obrázek 27. Hlubokotažný nástroj pro jednočinný lis [25]	40
Obrázek 28. Zkouška tvrdosti podle Brinella [27]	43
Obrázek 29. Zkouška tvrdosti podle Rockwella – vlevo HRB a vpravo HRC [7]	43

<i>Obrázek 30. Zkouška tvrdosti podle Vickerse</i>	44
<i>Obrázek 31. Podstata zkoušky tvrdosti podle Knoop [29]</i>	46
<i>Obrázek 32. Srovnání vtisku provedeného Knoopovým a Vickersovým indentorem do stejného materiálu a při stejném zatížení [32]</i>	46
<i>Obrázek 33. Zkouška hloubení podle Erichsena [27]</i>	47
<i>Obrázek 34. Tvary trhlin pro hlubokotažné plechy (vlevo) a nevhodné plechy pro hluboké tažení (vpravo) [27]</i>	48
<i>Obrázek 35. a) zkušební těleso pro stanovení FLC křivek, b) tvary zkušebních vzorků pro různé oblasti FLD diagramu [34]</i>	48
<i>Obrázek 36. a) Schéma FLC křivky mezní tvářítečnosti b) Schéma LDH/Nakajima zkoušky [35]</i>	49
<i>Obrázek 37. Princip kališkovací zkoušky [2]</i>	49
<i>Obrázek 38. Princip zkoušky podle Siebela a Pompa [2]</i>	50
<i>Obrázek 39. a) Princip zkoušky podle Fukuiho [13], b) Tvar trhliny při Fukuiho zkoušce [37]</i>	51
<i>Obrázek 40. Příklad výsledku tvářítečnosti s FLD grafem</i>	53
<i>Obrázek 41. Příklad výsledku Max failure</i>	54
<i>Obrázek 42. Příklad výsledku Thinning</i>	54
<i>Obrázek 43. Zkušební stroj BUP 600</i>	59
<i>Obrázek 44. Vzorky po tažení podle Erichsena (zleva plech 1,5 mm, 1,0 mm a 0,5 mm)</i> ...	60
<i>Obrázek 45. Vzorky po tažení podle Nakajimi (zleva plech 1,5 mm, 1,0 mm a 0,5 mm)</i>	62
<i>Obrázek 46. Graf závislosti síly tažení na hloubce tažení podle Erichsena pro materiál EN AW-1050A</i>	63
<i>Obrázek 47. Graf závislosti síly tažení na hloubce tažení podle Nakajimi pro materiál EN AW-1050A</i>	64
<i>Obrázek 48. Model součásti podle Erichsena (vlevo) a podle Nakajimi (vpravo)</i>	65
<i>Obrázek 49. Tabulka vlastností materiálu EN AW-1050A a volba tloušťky plechu</i>	66
<i>Obrázek 50. Výrobní plán</i>	66
<i>Obrázek 51. Nastavení geometrie tažníku pro metodu podle Erichsena (vlevo) a metodu podle Nakajima (vpravo)</i>	67
<i>Obrázek 52. Přístřih plechu podle Erichsena (vlevo) a podle Nakajima (vpravo)</i>	67
<i>Obrázek 53. Geometrie drážky</i>	68
<i>Obrázek 54. Popis FLD diagramu</i>	68
<i>Obrázek 55. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 0,5 mm</i>	69
<i>Obrázek 56. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 1,0 mm</i>	70

Obrázek 57. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Erichsen – 1,5 mm	71
Obrázek 58. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Nakajima – 0,5 mm	72
Obrázek 59. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Nakajima – 1,0 mm	73
Obrázek 60. Porovnání simulace a FLD diagramu s reálným výtažkem Nakajima – 1,5 mm	74
Obrázek 61. Brusné zařízení AutoMet 250	75
Obrázek 62. Vybroušené vzorky vyřezaných segmentů	75
Obrázek 63. Oblasti měření podle metody Erichsena	76
Obrázek 64. Oblasti měření podle metody Nakajima	77
Obrázek 65. Micro-Combi Tester	77
Obrázek 66. Graf vtiskové tvrdosti HIT – Erichsen	79
Obrázek 67. Graf vtiskové tvrdosti HIT – Nakajima	80
Obrázek 68. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse HVIT – Erichsen.....	81
Obrázek 69. Graf mikrotvrdosti podle Vickerse HVIT – Nakajima	82
Obrázek 70. Graf vtiskového modulu pružnosti – Erichsen	83
Obrázek 71. Graf vtiskového modulu pružnosti – Nakajima	84
Obrázek 72. Graf elastické práce – Erichsen	86
Obrázek 73. Graf elastické práce – Nakajima.....	87
Obrázek 74. Graf plastické práce – Erichsen	88
Obrázek 75. Graf plastické práce – Nakajima	89

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1. Mezinárodní číselný systém označování slitin hliníku.....	14
Tabulka 2. Označení vybraných stavů slitin a podskupin tepelného zpracování	15
Tabulka 3. Zkoušky tvrdosti podle Vickerse – typy zkoušek a rozsahy použití [7]	45
Tabulka 4. Chemické vlastnosti hliníku EN AW-1050A H24 dle ČSN EN 485-2+A1 [42].	58
Tabulka 5. Mechanické vlastnosti hliníku EN AW 1050A H24 dle ČSN EN 573-3+A1 [43]	58
Tabulka 6. Technický přehled zařízení BUP 600 Zwick/Roell	60
Tabulka 7. Pracovní podmínky pro metodu podle Erichsena.....	60
Tabulka 8. Výsledky tažení podle Erichsena	61
Tabulka 10. Pracovní podmínky pro metodu podle Erichsena.....	61
Tabulka 11. Výsledky tažení podle Nakajimi	62

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA P I: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 0,5 MM

PŘÍLOHA P II: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 1,0 MM

PŘÍLOHA P III: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 1,5 MM

PŘÍLOHA P I: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 0,5 MM

Inspection certificate No. **212313CZ**
EN 10204/3.1

Dodavatel (Supplier): Alcom Alval s.r.o. Komerční 531 251 01 Nupaky Česká republika IČ: 25352822 DIČ: CZ25352822 Tel: 00420 554 773 052-5 Fax: 554 773 050 E-mail: hlinik@hlinik.cz	Odběratel (Consignee): KALINA industries s.r.o. U Tescomy 255 760 01 Zlín 1 Česká republika IČ: 27758991 DIČ: CZ27758991 Tel: 00420 577 006 831 Fax: 00420 577 006 848 E-mail: info@kalina.cz
Materiál (Material): BPL000501050AH24 tl. 0,50 mm; PLECH; EN AW-1050A H24; EN 573-3, EN-485-1+A1,-2,-4; Al 99,5; polotvrdý	
Rozměr (Dimension) [mm]: 1000x2000 mm	
Množství (Quantity): 40,00 ks	

Kupní smlouva (Contract): KS 2262868
Objednávka (Purchase order): 222-2200163
Dodací list (Shipping document): DLV 2201717
Originální atest (OIC No.): MEC 11910/21
Ze dne (Date): 8.6.2021
Původ zboží (Origin): CZ

Mechanické vlastnosti (Mechanical properties)

Číslo šarže (Lot number)	Číslo tavby (Cast number)	Pevnost v tahu (Tensile strength) [Mpa]	Mez kluzu (Yield strength) [Mpa]	Tažnost (Elongation) [%]	Tvrdość HB (Hardness)
14455	D 133	118,2	94,6	A50=24,7 A10=36,1	-

Chemické složení (Chemical composition) [%]

Prvek (Element)	Silicon Si	Iron Fe	Copper Cu	Manganese Mn	Magnesium Mg	Chromium Cr	Zinc Zn	Titanium Ti	Aluminium Al
Hodnota (Content)	0,04482	0,25239	0,00700	0,00240	0,00195	0,00158	0,00435	0,02401	99,59

Poznámka (Note): -

Za správnost údajů odpovídá: Ivan Vodák

Podpis:

Razítko: 

Ivan Vodák
IČ: 25352822
DIČ: CZ25352822

Alcom Alval s.r.o.
Komerční 531
251 01 Praha-Nupaky



PŘÍLOHA P II: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 1,0 MM

PMS

TEST SERTİFİKASI INSPECTION CERTIFICATE

Tarih / Date

21.01.2022

(EN 10204-3.1'e göre düzenlenmiştir.)

(Prepared according to EN 10204-3.1)

Sipariş No / Order Number: 8821258 Müşteri Adı / Customer Name: THYSSENKRUPP
Kafile No / Heat Number: R882125805/1 Alaşım - Kondüsyon / Alloy - Temper: 1050 H14/H24
Paket No / Package Number: R22.0019 Ölçüler / Dimensions: 1,00 x 1000 mm
Müşteri No / Order No: ZI21001588

Kımyasal Bileşim / Chemical Composition (EN 573-3)

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Ni	Zn	Ti	Ga	V	Zr	Al
min													99,500
max	0,250	0,400	0,050	0,050	0,050	.....	.....	0,070	0,050	.....	.....	0,030	
Sonuçlar/ Test Result	0,132	0,233	0,008	0,038	0,014	0,000	0,005	0,005	0,017	0,010	0,014	0,001	99,523

Mekanik Özellikler / Mechanical Properties (EN 485-2)

	Haddelenme Yönüne 90° Dik Transverse Direction (90°)			Haddelenme Yönüne Paralel Rolling Direction		
	Çekme Muk. Tensile Strength Rm (MPa)	Akma Muk. Yield Strength Rp0,2 (Mpa)	Uzama (Elongation) A50 mm (%)	Çekme Muk. Tensile Strength Rm (MPa)	Akma Muk. Yield Strength Rp0,2 (Mpa)	Uzama (Elongation) A50 mm (%)
min	105,00	75,00	5,00	105,00	75,00	5,00
max	145,00			145,00		
Test Sonucu / Test Results	136,42	127,45	8,04			

Tensile specimen is prepared according to TS EN ISO 6892-1 standard

Çekme numunesi TS EN ISO 6892-1 standardına göre hazırlanmıştır.

Yüzey Özellikleri / Surface Properties

Düz / Plain



Çetalı / Tread Plates;

5 Bar



Gofrajlı / Embossed Products;

Stucco



Diamond



Diamond



Yağsız / Degreased



Az Yağlı / Slightly Oil



Yağlı / Mill Finish



Coils/Sheets/Tread Plates are produced according to EN 485/1-2-4, EN 573-3, EN 1386 Standards

Tensile Test: ZWICK Z050, EN 6892-1

Spectral Analysis: BRUKER QUANTRON

Notlar ve Özel Talepler / Notes and Special Demands:

Kalite Sağlama ve Geliştirme Şefliği

PŘÍLOHA P III: HUTNÍ ATEST MATERIÁLU EN AW 1050A TL. 1,5 MM



**Hydro Aluminium
Rolled Products**

PL 108230
thyssenkrupp Materials Poland S.A.
ul. Gudziszka 159
87-100 TORUŃ
Poland

Inspection Certificate no: KRM 104522 - 29

According to EN 10204 - type 3.1.
EN 15088
FPC certificate 1071-CPR-1900
Intended use Structural products for construction works
Date 29/03/2021 Page 1 of 1
Customer order no ZI21000998 SK
Our order no 682212-29
Invoice no KRM102248
Packing list no KRM104522
Product 1.500 x 1000
Description of product Sheet/plate/strip
Gross weight 4740 kg
Net weight 4710 kg
Customer part no
Alloy / temper EN AW-1050A-H24
105025 24
Customer Spec
Dangerous substances According to REACH Annex 14

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Zn	Ti	Al
Min								99.50
Max	0.25	0.40	0.05	0.05	0.05	0.07	0.05	
Coil no.								
1058005	0.17	0.21	0.004	0.008	0.0007	0.004	0.01	99.6

Mechanical properties

	Min	Max	Rp0.2	Rm	Elong A50	Thick-ness	Test Direction
Cust.			75	105	5	1.450	
				145		1.510	
Coil no.							
1058005			127	134	10	1.455	Transverse

Material Specification and Test Results
Standard EN 485/515/573

Kristian Stray (sign.)

Plant Metallurgist