

Vliv technologie hlubokého tažení na vlatnosti plechového dílu

Bc. Jakub Zajíček

Diplomová práce
2025



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2024/2025

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení:	Bc. Jakub Zajíček
Osobní číslo:	T23313
Studijní program:	N0788A270002 Výrobní inženýrství
Forma studia:	Prezenční
Téma práce:	Vliv technologie hlubokého tažení na vlastnosti plechového dílu

Zásady pro vypracování

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

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

Seznam doporučené literatury:

DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. Technologie tváření: plošné a objemové tváření. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. 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. ISBN 978-1-4471-4098-6.

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

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

Datum zadání diplomové práce: **2. ledna 2025**
Termín odevzdání diplomové práce: **9. května 2025**

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

L.S.

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

Ve Zlíně dne 3. února 2025

PROHLÁŠENÍ AUTORA DIPLOMOVÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že

- odevzdáním diplomové práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., v platném znění bez ohledu na výsledek obhajoby;
- diplomová práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a bude dostupná k nahlédnutí;
- jedno vyhotovení diplomové práce v listinné podobě bude ponecháno Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně k uložení;
- 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 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(a) samostatně a použitou literaturu jsem řádně citoval(a); v případě publikace výsledků budu uveden(a) jako spoluautor;
- odevzdaná verze diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis autora

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá hlubokým tažením plechů a procesními parametry této technologie. V teoretické části se tato práce obecně zabývá technologií hlubokého tažení, jeho dělením, principem a nástrojem. Dále teoretická část obsahuje informace o procesních podmínkách při hlubokém tažení, typech defektů vznikajících při tažení a materiálech používaných pro tažení. V teoretické části lze také nalézt informace o FLD diagramu, zkouškách tvárnosti a simulacích hlubokého tažení.

V praktické části se tato práce zabývá zkouškami materiálu dle Erichsena, dle Nakajimi bez brzdné drážky a Nakajimi s brzdnou drážkou. U těchto zkoušek zkoumáme, zda jsou vybrané materiály vůbec vhodné pro hluboké tažení (zkouška dle Erichsena) a vliv změny procesních parametrů na výsledek zkoušky (zkouška dle Nakajimi). Variovanými procesními podmínkami při zkouškách dle Nakajimi jsou síla na přidržovači, rychlost tažení a vliv mazání polotovaru. Vybrané materiály jsou podrobeny jednotlivým zkouškám, které jsou následně zpracovány do přehledných tabulek a grafů. Na závěr praktické části je vytvořena simulace reálného procesu a jeho porovnání.

Výstupem této práce je vyhodnocení jednotlivých materiálů a vlivu procesních parametrů na průběh zkoušek.

Klíčová slova: Tváření, hluboké tažení, plech, test dle Erichsena, test dle Nakajimi, FLD diagram, simulace hlubokého tažení

ABSTRACT

This thesis focuses on deep drawing of sheet metal and the process parameters of this technology. The theoretical part generally discusses the technology of deep drawing, its classification, principles, and tools. Furthermore, it includes information about the process conditions during deep drawing, types of defects that may occur during the process, and the materials used for drawing. The theoretical section also covers information about the FLD (Forming Limit Diagram), formability tests, and deep drawing simulations.

The practical part of the thesis deals with material testing according to the Erichsen test, the Nakajima test without a draw bead, and the Nakajima test with a draw bead. These tests examine whether the selected materials are suitable for deep drawing (Erichsen test) and the effect of changing process parameters on the test results (Nakajima test). The varied process parameters in the Nakajima tests include blank holder force, drawing speed, and the effect of lubrication on the blank. The selected materials are subjected to individual tests, the results of which are then compiled into clear tables and graphs. At the end of the practical part, a simulation of a real process is created and compared with actual results.

The outcome of this thesis is an evaluation of the individual materials and the influence of process parameters on the course of the tests.

Keywords: Forming, deep drawing, sheet metal, Erichsen test, Nakajima test, FLD diagram, deep drawing simulation

Rád bych touto cestou poděkoval vedoucímu své diplomové práce, panu doc. Ing. Martinu Ovsíkovi Ph.D., za cenné rady, odborné vedení a čas, který mi věnoval během zpracování této práce. Jeho trpělivost, vstřícnost a ochota sdílet své zkušenosti pro mě byly velkou pomocí. Velmi si vážím jeho podpory a přístupu, který významně přispěl k dokončení této diplomové práce.

OBSAH

ÚVOD.....	15
I TEORETICKÁ ČÁST	16
1 TECHNOLOGIE HLUBOKÉHO TAŽENÍ.....	17
1.1 DĚLENÍ HLUBOKÉHO TAŽENÍ	17
1.1.1 Podle počtu operací	17
1.1.2 Podle použití přidržovače.....	17
1.1.3 Podle změny tloušťky materiálu v průběhu tažení.....	17
1.2 PRINCIP TECHNOLOGIE HLUBOKÉHO TAŽENÍ	18
1.3 NÁSTROJ PRO TECHNOLOGII HLUBOKÉHO TAŽENÍ	18
1.4 NEKONVENČNÍ METODY HLUBOKÉHO TAŽENÍ	18
1.4.1 Metoda Guerin	18
1.4.2 Metoda Marform	19
1.4.3 Metoda Hydroform.....	20
1.4.4 Tváření výbuchem.....	20
2 NASTVAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK PŘI TAŽENÍ	21
2.1 GEOMETRIE NÁSTROJE	21
2.1.1 Tažná mezera	22
2.2 TŘENÍ A MAZÁNÍ NÁSTROJE PŘI TAŽENÍ	22
2.2.1 Výhody a nevýhody	23
2.2.2 Typy maziv.....	23
2.2.3 Aplikace maziv.....	24
2.3 RYCHLOST TAŽENÍ	24
2.4 TAŽNÁ SÍLA.....	25
2.5 SÍLA NA PŘIDRŽOVAČI	25
2.6 TEPLOTA PŘI PROCESU.....	25
2.7 TVAR POLOTOVARU	26
2.8 MEZNÍ POMĚR TAŽNOSTI	26
2.9 KOEFICIENT DEFORMAČNÍHO ZPEVNĚNÍ	26
3 TYPY DEFEKTŮ PŘI HLUBOKÉM TAŽENÍ.....	27
3.1 ZVLNĚNÍ (ZVRÁSNĚNÍ) MATERIÁLU	27
3.2 ŽEHLENÍ	27
3.3 ODÍRÁNÍ.....	28
3.4 VZNIK „POMERANČOVÉ KŮRY“	28
3.5 EARING	29
3.6 ODPRUŽENÍ	29
3.7 ZÚŽENÍ MATERIÁLU (TVORBA KRČKU)	29

3.8	VZNIK PRASKLIN A TRHANÍ	30
4	MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO TAŽENÍ.....	31
4.1	NÍZKOUHLÍKOVÁ OCEL	31
4.1.1	Modifikována nízkouhlíková ocel.....	31
4.2	OCELI S POVRCHOVOU ÚPRAVOU	32
4.2.1	Plechý se zinkovými povlaky	32
4.2.2	Plechý s hliníkovými povlaky	32
4.2.3	Plechý s fosfátovými povlaky	32
4.2.4	Lakované plechy.....	33
4.3	NEREZOVÉ OCELI.....	33
4.3.1	Austenitické nerezové oceli.....	33
4.3.2	Feritické nerezové oceli.....	33
4.4	HLINÍKOVÉ SLITINY	34
4.5	HOŘČÍKOVÉ SLITINY	34
5	FLD DIAGRAM	35
5.1	ANALYTICKÉ URČENÍ FLD DIAGRAMU	36
5.1.1	Hillův model.....	36
5.1.2	Swiftův model	37
5.1.3	Modifikace kritéria maximální síly (MMFC)	37
5.1.4	NADDRG model.....	37
5.1.5	Jones-Gills model.....	37
5.1.6	Marciniak-Kuczynsky (M-K) model.....	37
5.2	VYUŽITÍ FLD DIAGRAMU V PRAXI	38
5.2.1	Postup použití FLD v praxi	38
5.3	FAKTORY OVLIVŇUJÍCÍ FLD DIGRAM	39
5.3.1	Vliv tloušťky tvářeného pechu	39
5.3.2	Vliv změny deformační dráhy	39
5.3.3	Vliv materiálu.....	40
6	ZKOUŠKY TVÁRNOSTI	41
6.1	ZKOUŠKA TAHEM	41
6.2	ZKOUŠKY HLUBOKOTAŽNOSTI.....	41
6.2.1	Zkouška dle Erichsena.....	41
6.2.2	Zkouška dle Engelhard-Grosse	42
6.2.3	Zkouška dle Fukui	43
6.3	ZKOUŠKY PRO EXPERIMENTÁLNÍ URČENÍ FLD	43
6.3.1	Zkouška dle Keelera.....	44
6.3.2	Zkouška dle Heckera	44
6.3.3	Zkouška dle Nakajimi	44
6.3.4	Zkouška dle Haska	45
6.3.5	Hydraulická zkoušky vyboulení.....	46
6.3.6	Zkouška dle Marciniaka	46

6.3.7	Porovnání různých zkoušek	47
7	SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ.....	48
7.1	ZADÁNÍ VSTUPNÍCH DAT	48
7.1.1	Okrajové podmínky	48
7.2	VÝSTUPNÍ DATA SIMULACE	48
II	PRAKTICKÁ ČÁST	50
8	CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE	51
9	VÝBEŘ MATERIÁLŮ PRO TAŽENÍ	52
9.1	PŘÍPRAVA TESTOVACÍCH VZORKŮ	52
9.2	OCEL HCT980X	52
9.3	OCEL HCT980XG	53
9.4	OCEL HC420LA	53
10	MĚŘENÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLECHU	54
10.1	PROCESNÍ PARAMETRY ZKOUŠKY	54
10.1.1	Výsledky a vyhodnocení měření vtiskové tvrdosti (H_{IT})	55
10.1.2	Výsledky a vyhodnocení měření tvrdosti dle Vickerse (HV_{IT}).....	56
10.1.3	Výsledky a vyhodnocení měření vtiskový modul (E_{IT})	57
10.1.4	Výsledky a vyhodnocení měření maximální hloubky vpichu (H_{MAX})	58
11	POPIS MĚŘICÍHO ZAŘÍZENÍ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ.....	59
12	POPIS POUŽITÝCH NÁSTROJŮ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ	60
12.1	ZKOUŠKA DLE ERICHSENA	60
12.1.1	Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Erichsena.....	60
12.2	ZKOUŠKA DLE NAKAJIMI.....	61
12.2.1	Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky	61
12.2.2	Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou	63
13	VÝSLEDKY ZKOUŠEK HLUBOKÉHO TAŽENÍ	64
13.1	ZKOUŠKA DLE ERICHSENA	64
13.1.1	Výsledky zkoušky dle Erichsena	64
13.1.2	Vyhodnocení zkoušky dle Erichsena	66
13.2	ZKOUŠKA DLE NAKAJIMI.....	67
13.2.1	Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací síly působící na přidržovači	67
13.2.2	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací síly působící na přidržovači	73
13.2.3	Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací rychlosti tažení	74
13.2.4	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací rychlosti tažení	77
13.2.5	Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací mazání	78

13.2.6	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzdne drážky s variací mazání	81
13.2.7	Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací síly působící na přidržovači	82
13.2.8	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací síly působící na přidržovači	87
13.2.9	Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací rychlosti tažení	88
13.2.10	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací rychlosti tažení	91
13.2.11	Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací mazání	92
13.2.12	Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací mazání	95
14	POROVNÁNÍ EXPERIMENTU SE SIMULACÍ	97
14.1	VOLBA SIMULAČNÍHO SOFTWARE	97
14.2	TVORBA SIMULACE.....	97
14.2.1	Model tažníku.....	97
14.2.2	Importování modelu	98
14.2.3	Volba materiálu pro simulaci	98
14.2.4	Výběr virtuálního stroje a plánu operací	99
14.2.5	Nastavení přidržovače	99
14.2.6	Nastavení addenda.....	101
14.2.7	Tvorba polotovaru pro simulaci	102
14.2.8	Tvorba brzdne drážky.....	102
14.3	VÝSLEDKY SIMULACE	103
14.3.1	Vyhodnocení simulace materiálu HCT980X a HCT980XG.....	104
14.3.2	Vyhodnocení simulace materiálu HC420LA	106
15	DISKUZE VÝSLEDKŮ	108
	ZÁVĚR.....	110
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	111
	SEZNAM OBRÁZKŮ	116
	SEZNAM TABULEK.....	121
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	122
	SEZNAM PŘÍLOH.....	123

ÚVOD

Tváření kovů je důležitou technologií při výrobě součástí v automobilovém, leteckém i spotřebním průmyslu. Jednou z nejrozšířenějších metod je hluboké tažení plechů, které umožňuje přetvářet plechové polotovary do složitých prostorových tvarů bez porušení jejich celistvosti. Tato technologie je efektivní, ale zároveň vyžaduje správný výběr materiálu, vhodné nastavení procesních parametrů a dobře navržený nástroj.

Cílem této diplomové práce je analyzovat proces hlubokého tažení a parametry, které ovlivňují kvalitu výsledného výtazku. Práce je rozdělena na teoretickou a praktickou část. Teoretická část se věnuje principům hlubokého tažení, používaným materiálům, běžným vadám vznikajícím během procesu a metodám hodnocení tvárnosti, včetně využití FLD diagramů a simulačních nástrojů. Praktická část zahrnuje experimentální zkoušky (dle Erichsena a dle Nakajimi) a posouzení vlivu vybraných procesních podmínek na průběh tažení a kvalitu výtazku.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 TECHNOLOGIE HLUBOKÉHO TAŽENÍ

Technologie hlubokého tažení je tvářecí proces, při kterém je z plošného polotovaru (většinou se jedná o plechovou tabuli nebo jinak tvarovaný přístřížek) za pomoci jednoho či více kroků vytvořen takzvaný výtažek. Tažný nástroj se skládá z řady komponent, avšak hlavními dvěma jsou tažník a tažnice, které působí na polotovar silou a mění tak jeho tvar. Nástroj je nejčastěji v technické praxi upínán do mechanických nebo hydraulických lisů (ať už se jedná o jednočinné nebo vícečinné stroje). Touto technologií lze vyrábět rozmanitý sortiment výrobků jako jsou nádoby, kryty, víka, díly karoserií atd. [1; 2; 3]

1.1 Dělení hlubokého tažení

Hluboké tažení lze dělit dle několika různých kritérií. V dalších kapitolách bude toto rozdělení popsáno a jeho vliv na proces hlubokého tažení.

1.1.1 Podle počtu operací

Hluboké tažení lze dělit dle počtu operací, kterými výtažek prochází. Jednodušší výrobky jsou taženy většinou na jeden či dva kroky. Složitější výrobky jsou naopak taženy na více operací. Počet kroků se také může odvíjet od druhu taženého materiálu, protože těžce tažitelné materiály vyžadují více kroků, pro vznik stejného výrobku. Méně tvárný materiál je třeba například přetvářet, aby nevznikali praskliny, které by se u materiálu s vyšší tažností neobjevovaly. [1]

1.1.2 Podle použití přidržovače

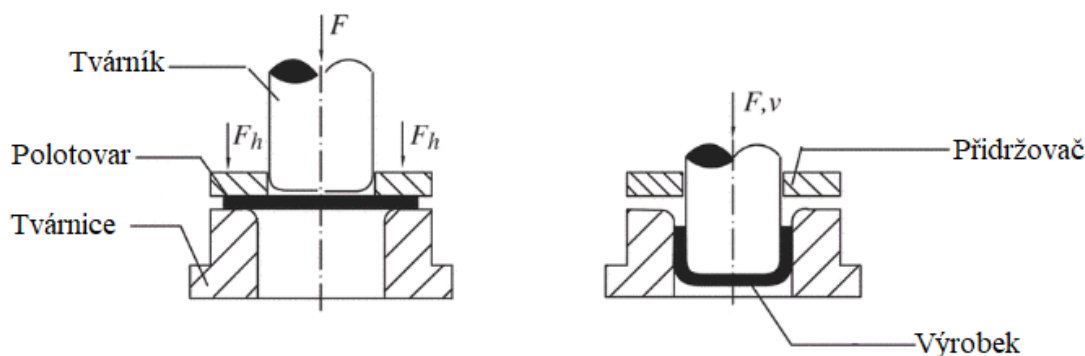
Tažný nástroj může ale nemusí mít přidržovač, proto dělení na tažení bez přidržovače nebo tažení s přidržovačem. Přidržovač je součást, která jak už z jeho jména vyplývá přidržuje materiál v určitém místě. Používá se pro eliminaci efektů jako je zvlnění nebo pro zefektivnění procesu přetváření materiálu. [1; 4]

1.1.3 Podle změny tloušťky materiálu v průběhu tažení

Tažení lze dělit také podle změny tloušťky materiálu v průběhu tváření na tažení beze změny tloušťky stěny (bez zeslabení stěny) a tažení se změnou tloušťky stěny (se zeslabením stěny). U tažených výrobků záleží na jejich konstrukci, u některých se efektu zeslabení stěny využívá a u dalších se může jednat o nežádáný jev. [1; 5]

1.2 Princip technologie hlubokého tažení

Hluboké tažení je založeno na přetvoření materiálu za pomoci síly, která působí skrz nástroj na polotovar bez toho, aniž by vznikla v materiálu prasklina. Při tváření je přesažena mez elasticity materiálu a materiál je tak nevratně tvářen do předem určeného tvaru. [4; 6]



Obrázek 1 – Schéma hlubokého tváření [6]

1.3 Nástroj pro technologii hlubokého tažení

Jak už bylo zmíněno v této kapitole nástroj pro hluboké tažení se skládá z řady různých součástí. Nejdůležitějšími částmi jsou však tažník, tažnice a přidržovač. Dalšími částmi pak jsou upínací a kotvící desky, vedení tažného nástroje (vodící čepy, vodící pouzdra, kluzná pouzdra, středící součástky atd.), doraz proti poškození, systém odpružení (mechanické nebo plynové pružiny), upínací systém (stopka pro upnutí) a spojovací materiál, který drží tažný nástroj pohromadě. [6; 7]

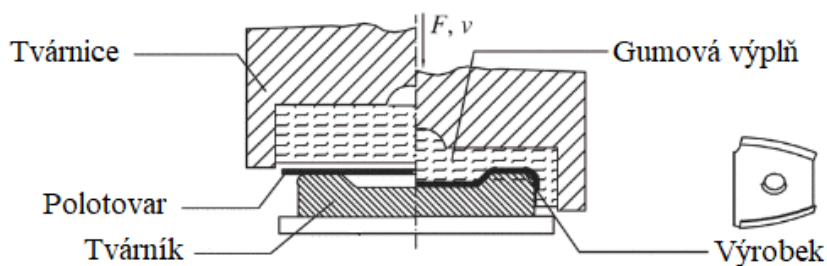
1.4 Nekonvenční metody hlubokého tažení

Nekonvenční metody hlubokého tažení využívají pro přenos síly na součást pružné médium místo tuhého tvárníku a tvárnice. Hlavní výhodou nekonvenčních metod spočívá v rovnoměrnějším rozložení tlaku při samotném tažení což má za následek, že se stěna výrobku nějak výrazně neztenčuje. Další výhodou je, že nekonvenční metody nezanechávají na výrobcích stopy po nástroji a není třeba je nijak dále opracovávat. Nevýhodou nekonvenčních metod je však delší doba tažení výrobku. [1; 6; 8]

1.4.1 Metoda Guerin

Metoda Guerin využívá pryžového ocelového tvárníku, na který působí tvárnice vyplněná pryží nebo polyuretanem, který se stlačuje a kopíruje tak tvar tvárníku. Materiál je vložen mezi tvárník a tvárnici s pryží a je tvarován rovnoměrným tlakem pryže. Tato metoda je

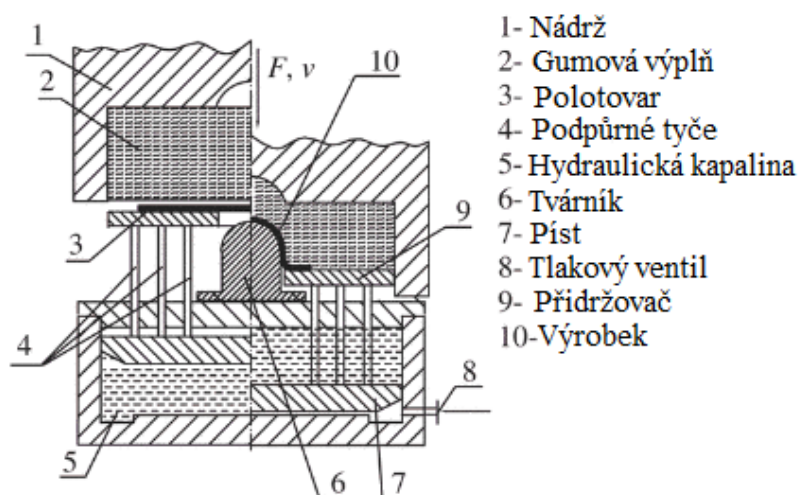
šetná vůči materiálu (nevznikají žádné stopy po nástroji na vnější straně), poměrně univerzální (stačí vyměnit tvárník) a dokáže na jeden tah vyrobít i relativně složité geometrie. Nevýhodou této technologie je dlouhý tvářecí cyklus a rychlé opotřebení pryžové části (pryžová část má tendenci se trhat po určitém počtu cyklů v závislosti na složitosti taženého dílu). [4; 6]



Obrázek 2 – Schéma metody Guerin [6]

1.4.2 Metoda Marform

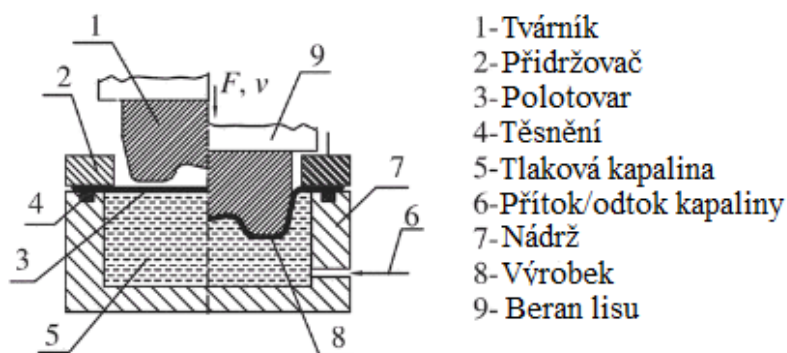
Metoda Marform je podobná metodě Guerin, avšak při metodě Marform je polotovar upnut mezi tvárnici vyplněnou gumou a přidržovačem, který pomalu spouští za pomoci podpůrných tyčí přes protitlak polotvar na kovový tvárník, kde získává svůj finální tvar. Metoda Marform se tudíž dá lépe kontrolovat než metoda Guerin, nevýhody gumového tvárníku však pořád přetrvávají. [4; 6]



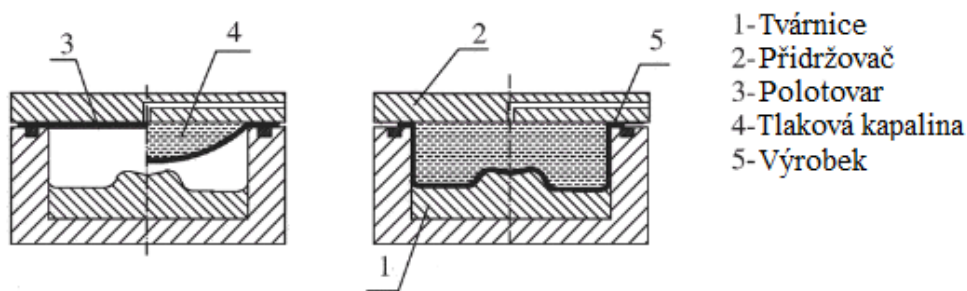
Obrázek 3 – Schéma metody Marform [6]

1.4.3 Metoda Hydroform

Metoda Hydroform spočívá v působení tlaku kapalinou na polotovaru. Hydroforming je rozdělen do dvou metod. První metoda je vtláčování polotovaru tvárníkem do nádrže s tlakovou kapalinou, která klade odpor. Druhou metodou je působení tlakové kapaliny na samotný polotovaru, který kopíruje tvar tvárnice. Výhodou oproti běžnému hlubokému tažení je možnost vytáhnout hlubší výrobky, tlak působí zcela rovnoměrně, a tak nedochází k zúžení stěn, je potřeba pouze jeden krok pro tažení a polotovaru může kopírovat poměrně komplexní geometrie, které bychom jinak nevyrobili. Nevýhodou je potřeba změny procesních podmínek při změně taženého materiálu. Tato metoda se v posledních letech začala využívat pro výrobu součástí pro letecký a automobilový průmysl. [4; 6; 8; 9]



Obrázek 4 – Schéma metody Hydroform s tvárníkem [6]



Obrázek 5 – Schéma metody Hydroform s tvárnici [6]

1.4.4 Tváření výbuchem

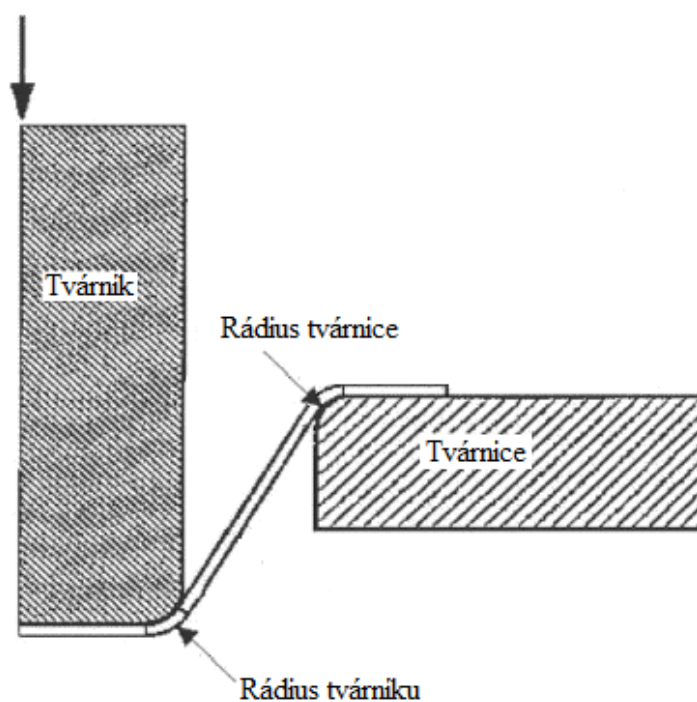
Tváření výbuchem je technologická operace, při které se využívá nárazová vlna z výbuchu. Polotovaru je položen na tvárnici, přidržen přidržovačem a následně je detonována trhavina, která vytvoří tlakovou vlnu a ta tvaruje samotný plech rychlostí až několik metrů za sekundu. Trhavina může být umístěna přímo na polotovaru nebo ponořena do tlakové nádoby. Toto tváření není vhodné pro složité geometrie, ale výhodou je vysoká rychlost. [10; 11]

2 NASTAVENÍ PROCESNÍCH PODMÍNEK PŘI TAŽENÍ

Pro správný průběh technologické operace hlubokého tažení je třeba nastavit vhodné podmínky, při kterých bude probíhat. Mezi tyto podmínky patří: geometrie nástroje (rádius hrany tvárníku a tvárnice), tažná mezera, tření a mazání při tažení, rychlost tažení, síla na přidržovači, mezní poměr tažnosti a koeficient deformačního zpevnění. [12; 13]

2.1 Geometrie nástroje

U geometrie nástroje jsou pro procesní podmínky nejdůležitějšími parametry zaoblení hrany tvárníku a tvárnice. Rádius hrany tažnice ovlivňuje množství materiálu vtaženého do nástroje tím, že materiál se přes větší rádius snadněji přemísťuje při tažení. Tím lze do určité míry snižovat potřebnou sílu pro samotné tažení a snižuje šanci na vznik ztenčování stěny. Pro těžko tvářitelné materiály se hrana tažnice může zkosit a zároveň zaoblit. Hrana tažníku musí mít také určitý rádius, kvůli možnosti vzniku trhlin na hraně u dna samotného výtažku. Moc malý rádius hrany tažníku by mohl působit spíše jako střížná hrana a vznikala by tak prasklina, která by se v průběhu tahu šířila a dno by se mohlo oddělit od zbytku výtažku. [12; 14; 15]



Obrázek 6 – Geometrie nástroje [12]

Poloměr tažnice u jednoduchého válcového výtažku lze spočítat dle empirického vzorce závislého na průměru polotovaru (přístřižku), průměru tažníku a tloušťky taženého plechu. Tento vzorec je vhodný pro oceli a materiály s podobnými vlastnostmi. [1; 16; 17]

$$R_T = 0,8 * \sqrt{(D - d) * t} \quad (1)$$

Kde:

R_T = Poloměr hrany tažnice [mm]

D = Průměr polotovaru (přístřižku) [mm]

d = Průměr tažníku [mm]

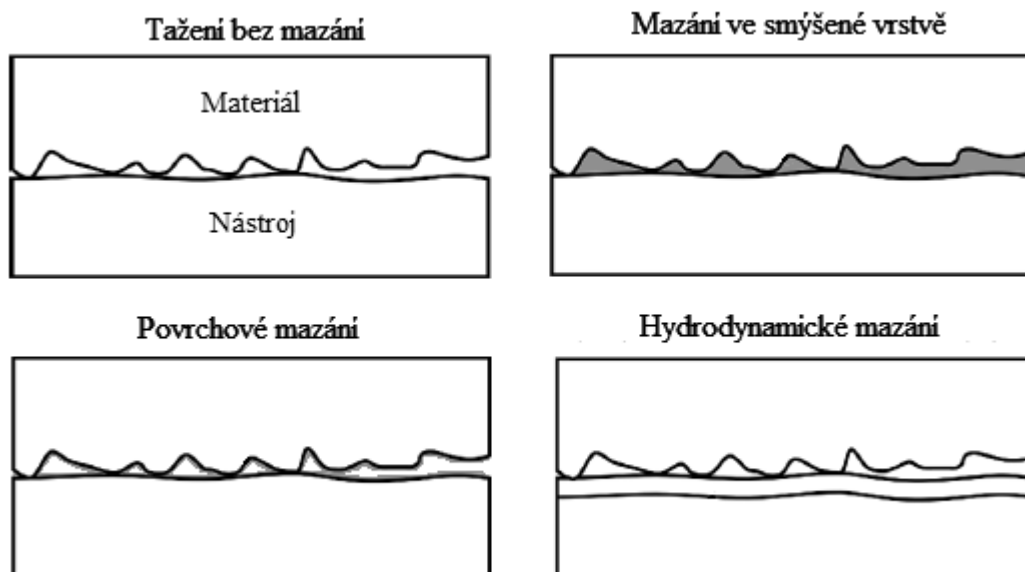
t = Tloušťka taženého materiálu [mm]

2.1.1 Tažná mezera

Tažná mezera je vůle mezi tažníkem a tažnicí. Tažná mezera se využívá především kvůli jevu ztenčování stěny. Tažná mezera také efektivně snižuje potřebnou sílu pro tažení. Tažná mezera je zabudována ve většině moderních hlubokotažných nástrojů kvůli jejím značným pozitivním efektům na proces tažení. Velikost tažné mezery je ve většině případů určena empirickými zkušenostmi konstruktéra nástroje nebo výpočtem a závisí na tloušťce taženého plechu a koeficientu pro daný materiál (0,06-0,1 u ocelí, u hliníku 0,02-0,04 a u většiny ostatních neželezných kovů 0,04-0,06). [1; 14]

2.2 Tření a mazání nástroje při tažení

U hlubokého tažení mohou být rozlišovány čtyřech stavy mazání materiálu. Prvním je tažení bez mazání, tento typ má nejvyšší třecí koeficient, a tudíž je povrch taženého plechu nejvíce ovlivněný tažným nástrojem. Druhým typem je povrchové (filmové) mazání, které je v běžné praxi nejpoužívanější, protože s využitím co nejmenšího množství mazání co nejvíce sníží koeficient tření. Dalším typem mazání je mazání ve smíšené vrstvě, kde je polotovar a nástroj v kontaktu co nejméně. Posledním typem je hydrodynamické mazání. U tohoto typu jsou tažník a polotovar odděleny souvislou vrstvou maziva, která výrazně snižuje koeficient tření (tření mezi nástrojem a materiálem dosahuje 10x menších hodnot než u tažení bez mazání). [18; 19]



Obrázek 7 – Typy mazání při hlubokém tažení [19]

2.2.1 Výhody a nevýhody

Při hlubokém tažení je výhodné využít mazání nástroje a tvářeného plechu z několika důvodů. Využitím mazání snižujeme šanci praskání polotovaru v kritických místech, kvůli snížení celkového tření mezi nástrojem a polotovarem. Povrch materiálu je méně poškozený a nástroje nezanechává tak výraznou stopu v porovnání s tažením bez mazání. Dále je samotný nástroj méně opotřebováván, a tudíž má delší životnost. Při použití mazání je možné samotný proces hlubokého tažení zefektivnit zvýšením rychlosti tažení, což vede k vyšší produkci. [12]

2.2.2 Typy maziv

Maziva používaná pro hluboké tažení se dělí především podle toho, na jaké bázi jsou založená. Jsou dělena na oleje, rozpustné oleje, polo syntetická maziva, syntetická maziva a suchá maziva. Oleje pro hluboké tažení jsou deriváty ropy jako jsou naftaleny a parafíny. Tyto oleje jsou používány u jednodušších operací a jejich pro zvýšení produktivity. Rozpustné oleje obsahují vodu a emulgátory pro snížení viskozity (do objemu je přidáváno až 50% vody). Rozpustné oleje mají podobné využití jak běžné oleje pro tažení, avšak jsou ve větším objemu značně levnější kvůli obsahu vody. Polo syntetická a syntetická maziva jsou kapaliny na bázi vody a jednoduchých uhlovodíků. Na rozdíl od běžných olejů pro tažení je přidáván minerálních olej maximálně do 30 % objemu. Tyto maziva jsou využívány ve širokém spektru aplikací v závislosti na jejich chemickém složení. Suchá maziva se dělí na maziva rozpustná ve vodě a nerozpustná ve vodě („horko tavitelná“). Vodou rozpustná

suchá maziva jsou aplikována na plechy před tažením zatím co horkotavitelná maziva jsou nanášena již při výrobě polotovaru válcováním. Tyto maziva vykazují lepší výkonnost než olejová maziva a jsou aplikovatelná téměř na všechny druhy tažení. [12]

2.2.3 Aplikace maziv

Správná aplikace maziv je při tažení klíčová, malé množství maziva může vést ke špatnému mazání zatím co příliš velké nanesená množství vede k plýtvání mazivem, a tudíž ke zvýšení ceny samotného procesu. Aplikaci maziv dělíme na „kapací“ metodu, nanášení houbou nebo mopem, nanášení válečky, elektrolytickou depozici a rozprašování maziva. „Kapací“ metoda je nejjednodušší metoda a spočívá v nanášení maziva kapáním na plech kontrolovaným tlakem. Nanášení houbou nebo mopem jsou také velice jednoduché a jsou využívány především v kusových aplikacích. Nevýhodou je však poměrně nepřesná kontrola nanášení a velké množství což vede k plýtvání. Tato metoda je také naprosto nevhodná pro sériové nebo velkosériové výroby. Nanášení válečky je poměrně rozšířená metoda. Mazivo je nanášeno na povrch plechu válečky což zajišťuje regulaci nanesené vrstvy na povrch. Tato metoda je tedy lehce automatizovatelná a použitelná pro široké spektrum aplikací pro plechy s jednoduchými profily. Elektrolytická depozice maziva je založena na nanášení maziva za pomoci elektrického náboje. Takto metoda je výhodná především pro aplikace s vysokou rychlostí tažení a neplýtvá mazivem. Tato aplikace však vyžaduje značnou počáteční investici, a proto není vhodná pro nízko sériové aplikace. Rozprašování maziva je založeno na nanesení maziva za pomoci plynu pod tlakem. Tato metoda je kontrolovatelná za pomoci nastavení vhodného tlaku plynu v závislosti na typu maziva. Nevýhodou této metody je použití pouze pro nízko viskózní maziva. [12]

2.3 Rychlost tažení

Rychlost tažení je parametr, který se musí přizpůsobit hlavně složitosti tažené geometrie. Čím složitější geometrie tím menší rychlost tažení. Hlavním faktorem je zde tření mezi nástrojem a výtažkem, pokud by byla rychlost příliš vysoká mohli by vlivem tření začít vznikat praskliny. Rychlost tažení je také ovlivněna materiálem, který je tažen. Materiály s lepší tažností mohou být taženy značně rychleji než materiály s nízkou tažností. U složitějších výtažků jsou využity stroje s několika servo nebo hydraulickými pohony, které na samotný výtažek působí v různých místech jinou rychlostí tažení. Lze tak dosáhnout složitějších geometrií než u strojů s jednoduchým zdvihem. [12; 20]

Tabulka 1 – Rychlost tažení pro různé kovové materiály [12]

Tažený materiál	Rychlost tažení [mm/min]
Ocel	91–254
Nerezová ocel	152–203
Měď	635–762
Zinek	635–762
Hliník	762–889
Mosaz	889–1016

2.4 Tažná síla

Tažná síla je síla působící v těžišti tažné operace. V dnešní době je tažná síla často určena v simulačních softwarech, ale jedná se o sumu sil, kterých je potřeba pro přetvoření polotovaru na daný výtažek. Jedná se o síly pro překonání tření mezi tažnicí a přírubou polotovaru, sílu mezi přírubou polotovaru a přidržovačem a síly v oblasti ohybu poloměru dna. [10; 12; 17; 18]

2.5 Síla na přidržovači

Síla na přidržovači je důležitá z pohledu přidržení polotovaru a prevence zvlnění při tažení. Síla na přidržovači musí být nastavena natolik vysoká, aby nevznikalo zvlnění, ale nesmí být příliš velká jinak klade odpor tažníku při tažení což může způsobovat ztenčení stěny nebo v krajních případech i praskání výtažku. Určení síly je relativně složité a je třeba zvážit řadu proměnných jako je rychlost tažení, tažná síla, geometrie nástroje, tvar polotovaru, tření a mazání nástroje atd. [12; 18; 21]

2.6 Teplota při procesu

Teplota při procesu tažení ovlivňuje přetvárný odpor, tažnost materiálu a jednoduší tok materiálu. Při vyšších teplotách tváření je také sníženo deformační zpevnění, které je v řadě případů považováno jako výhoda pro tažené výrobky. Nástroj za vyšších teplot může více opotřebovávat a je třeba jej upravit, tak aby byl využitelný za vyšších teplot což vede k vyšším nákladům na výrobu. [12]

2.7 Tvar polotovaru

Tvar polotovaru je především závislý na finálním tvaru výtažku. Pro složitější výtažky je polotovar předtvarován, tak aby operace hlubokého tažení proběhla co nejjednodušeji bez potřeby použít příliš vysokou sílu (potřebná síla může být snížena až od třetinu), polotovar pro tažení je menší, než kdyby se jednalo o tabuli bez předtvarování nebo vícestupňové nástroje. Předtvarování polotovaru také zmenšuje šanci vzniku zvlnění nebo trhlin při tažení složitějších geometrií. [18]

2.8 Mezní poměr tažnosti

Mezní poměr tažnosti je hodnota závislá na fyzikálních vlastnostech materiálu. Tato hodnota je závislá na řadě proměnných. Největší efekt z těchto proměnných má však tvárnost materiálu. U běžných válcových výtažku se tento poměr tažnosti označuje LDR (kde L je délka výtažku, D je průměr polotovaru a R je průměr výtažku). U běžných ocelí se tato hodnota pohybuje od 1,8 do 2,2, u tvárných slitin hliníku, mědi a manganu 2,1 a u Mosazných slitin od 1,7 do 2,2. Tyto hodnoty jsou však jenom obecný popis větší skupiny materiálu a pro přesné určení této hodnoty je třeba provést řadu testů. [12]

$$LDR = \frac{d_{max}}{d} \quad (2)$$

Kde:

LDR = Mezní poměr tažnosti [-]

d_{max} = Maximální průměr polotovaru (bez vzniku trhliny při tažení) [mm]

d = průměr výtažku [mm]

2.9 Koeficient deformačního zpevnění

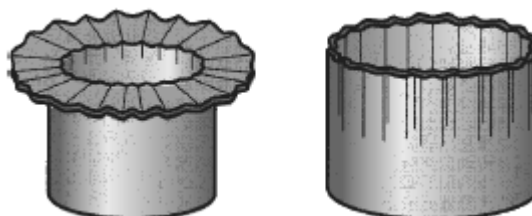
Jelikož je hluboké tažení prováděno za studena (teploty pod hodnotou rekrystalizace Ac_1) je materiál přetvářen, a tudíž vzniká zpevnění způsobeno deformací materiálu. Toto zpevnění je anizotropního charakteru což znamená, že je orientované (v tomto případě podélně ve směru tažení). Stěny a rádius u nádob jsou tudíž pevnější a tvrdší než výrobek se stejnou geometrií vyrobený technologií, při které toto zpevnění nevzniká. [10; 12]

3 TYPY DEFEKTŮ PŘI HLUBOKÉM TAŽENÍ

Proces hlubokého tažení s sebou nese riziko vzniku různých defektů, které mohou negativně ovlivnit kvalitu výsledného výrobku. Mezi tyto defekty patří zvlnění (zvrásnění), žehlení (redukce tloušťky stěny), odírání, vznik „pomorančové kůry“, earing (tvorba uší), odpružení, vznik lokalizovaného zúžení materiálu nebo také vznik prasklin a trhání. Za pomoci FLD je však možné se řadě z těchto defektů vyhnout. FLD je obzvláště efektivní v předpovídání zvlnění, vzniku prasklin a trhlin. [12]

3.1 Zvlnění (zvrásnění) materiálu

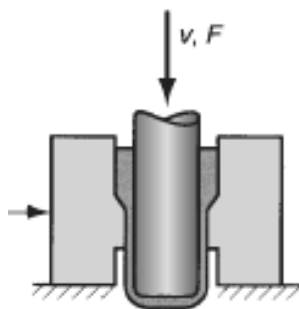
Zvlnění vzniká v oblastech okrajů polotovaru a postupuje v průběhu tažení do středu součásti. Vznik zvlnění závisí na tloušťce polotovaru, mechanických vlastnostech materiálu, tvaru a rozměrech taženého profilu, rychlosti tažení, typu přidržovače a síle působící na přidržovači. U tažení je odolnost proti zvlnění také ovlivněna stupněm deformace materiálu. Tento poznatek je důležitý zejména kvůli jednoduchému řešení, které přináší. Použitím tažných žeber nebo brzdných drážek je možné minimalizovat vznik zvlnění. Tento efekt lze také ze značné části ovlivnit zvýšením síly na přidržovači, materiál je tak nucen se více deformovat, což zvyšuje stupeň deformace materiálu. [8; 9; 21; 22]



Obrázek 8 – Zvlnění materiálu na přírubě (vlevo) a na obvodu (vpravo) [16]

3.2 Žehlení

Žehlení je jev, při kterém je redukována tloušťka stěny zmenšením tažné mezery (vůle mezi tažníkem a tažnicí je menší než tloušťka samotného polotovaru). U žehlení je klíčový faktor pro vznik tohoto efektu síla, kterou působí tažník na materiál. Tohoto efektu však lze využít i pro zvýšení koeficientu deformačního zpevnění. [12]



Obrázek 9 – Žehlení [16]

3.3 Odírání

Odírání je efekt, při kterém jsou částice tvárnice odírány do materiálu výtažku. Při tomto procesu je povrch výtažku poškozen a samotný nástroj se výrazně opotřebovává. Tento efekt je striktně negativní a je v nejlepším zájmu se mu vyhnout. Největší podíl má na tomto efektu kvalita povrchu tvárnice (povrchová drsnost, chemicko-tepelné zpracování nebo povlak tvárnice) a zvolený typ mazání hlubokotažného nástroje. Cílem je co nejvíce snížit koeficient tření mezi nástrojem a polotovarem, tudíž je ideální mít co „nejhladší“ tvárnici a při nejlepším hydrodynamické mazání. [12]



Obrázek 10 – Odírání [16]

3.4 Vznik „pomerančové kůry“

„Pomerančová kůra“ je efekt ovlivněný čistě velikostí zrn materiálu. Projevuje se na vnější straně taženého materiálu vznikem nerovnoměrné textury. Tato textura může mít za následek špatnou pevnost (mohou vznikat praskliny na hranicích zrn). Vznik této textury také může být nežádáný z estetického hlediska. Tento efekt lze eliminovat tepelnou úpravou materiálu (normalizační žíhání pro zjemnění zrn je velice časté řešení) nebo metalurgickými úpravami jako je přidání legur, které mají za následek zjemnění zrna. [12]

3.5 Earing

Earing nebo také tvorba uší je efekt, při kterém se na krajích výtažku tvoří uši. Tento jev je způsoben plošnou anisotropií polotovarového materiálu (materiál má jiné mechanické vlastnosti v různých rovinách). Obvykle se tyto „uši“ objevují v sudém počtu 2, 4 nebo 6 (v krajních případech i 8, což je běžné spíše u měkčích kovů jako jsou slitiny mosazi). Jediný způsob, jak se vyhnout tvorbě uší je pracovat s materiálem, který je dokonale homogenní, avšak jednodušším a běžnějším řešením tohoto problému je obyčejný ořez vrchní části výtažku (část, na které se vytvořili uši). [12]



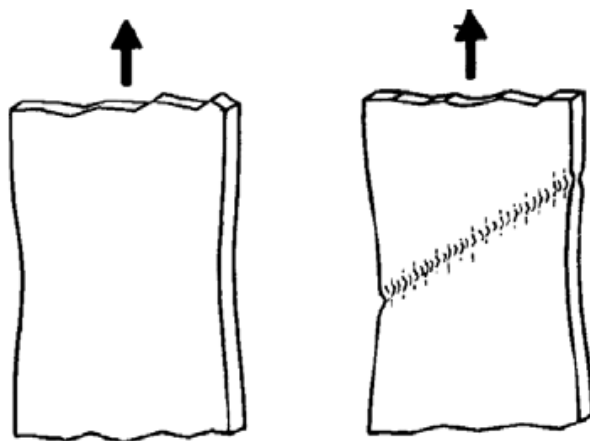
Obrázek 11 – Earing [16]

3.6 Odpružení

Jelikož je materiál přetvářen nad limitem elasticity je nevyhnutelné, že po uvolnění sil se některé části odpruží čímž vzniká rozměrová nepřesnost výroby. Toto odpružení je negativní jev, s kterým musíme počítat již při návrhu nástroje pro tváření. Odpružení se řeší kompenzací, avšak i v dnešní době s použitím simulačních softwarů není žádné univerzální řešení, které by fungovalo pro všechny druhy aplikací. [8; 12]

3.7 Zúžení materiálu (tvorba krčku)

Zúžení materiálu vzniká v případě, že je na materiál vyvíjeno až příliš velké zatížení v krátkém čase nebo je přesažen limit tvárnosti. Pokud je materiál ve své struktuře nehomogenní je možný vznik i takzvaného lokalizovaného zúžení, které vzniká právě v těch místech s nejhoršími mechanickými vlastnostmi. Řešením tohoto efektu je využití taženějších nebo pevnějších materiálu, pokud je to možné anebo snížení zatížení a rychlosti tažení, pokud výměna materiálu není možná. [8]



Obrázek 12 – Zúžení materiálu (vlevo)
a lokální zúžení materiálu (vpravo) [8]

3.8 Vznik prasklin a trhaní

K trhání taženého dílu dochází z několika důvodů. Jedním z nich je příliš vysoká síla s rychlostí tažení, což vede k překročení limitu tvárnosti a vzniku prasklin. Dalším je příliš velká síla na přidržovači, která způsobuje špatné klouzání polotovaru a ohýbání přes rádius hrany tvárnice, což vede k ztenčení materiálu a praskání. Geometrie samotného výtažku hraje také značnou roli. Nevhodně navržený výrobek tak může být zcela nevyrobitelný bez vzniku prasklin nebo trhlin. [8; 12]



Obrázek 13 – Vznik praskliny [16]

4 MATERIÁLY POUŽÍVANÉ PRO TAŽENÍ

Materiály pro hluboké tažení jsou vybírány vzhledem k několika různým kritériím. Mezi tyto kritéria patří mechanické vlastnosti materiálu, metalografické vlastnosti a chemické vlastnosti. Pro dosažení co nejkvalitnějších výrobků je nezbytné znát tyto vlastnosti.

Mezi nejběžnější materiály pro hluboké tažení patří nízkouhlíkové oceli, oceli s povrchovou úpravou, nerezové oceli, hliníkové slitiny a hořčíkové slitiny. V této kapitole budou tyto popsány jednotlivé materiály, jejich vlastnosti a proč jsou využívány. [12; 22]

4.1 Nízkouhlíková ocel

Ocelové plechy pro tažení se vyrábí v širokém chemickém složení, nejčastěji se však jedná o nízkouhlíkové nelegované nebo nízkolegované oceli. Nízkouhlíkové oceli pro tváření běžně obsahují 0,03 až 0,20 % uhlíku, 0,15 až 0,50 % manganu, maximálně 0,035 % fosforu a 0,04 % síry. Tyto plechy jsou vyráběny obvykle válcováním za studena a jsou rekrytalizačně žíhány pro odstranění deformace zrn. Koeficient deformačního zpevnění (n) se u těchto typů ocelí pohybuje kolem 0,18 až 0,22. Takovéto plechy mají vysokou tvárnost a využívají se zejména pro výrobu karoserií automobilů, oplátování spotřebičů nebo různé druhy nádob. Nevýhodou těchto plechu je však relativně nízká pevnost a riziko vzniku koroze. Po tažení musí být plech nějakým způsobem upraven (povlakování, lakování, potažení jiným kovem atd). [12]

4.1.1 Modifikována nízkouhlíková ocel

Modifikovaná nízkouhlíková ocel obsahuje větší procentuální zastoupení manganu (až 1,35 % u ocelí válcovaných za tepla a 0,9 % u ocelí válcovaných za studena). Zároveň je přidán prvek, který podporuje tvorbu karbidů a nitridů. Množství těchto prvků v oceli je minimální (50 PPM) a jedná se nejčastěji o titan nebo niob. Tato modifikace oceli způsobuje snížení meze kluzu což vede k lepší tvarovatelnosti a vysoké tažnosti. Tyto oceli jsou využívány pro hluboké tažení. [12]

4.2 Oceli s povrchovou úpravou

Téměř všechny oceli používané pro tažení jsou dostupné ve variantě s povrchovou úpravou. Od běžných nízkouhlíkových ocelí pro karoserie až po vysokopevnostní oceli pro konstrukční prvky. Mezi běžné způsoby úpravy povrchu plechů patří potahování povrchu jiným kovem (zinek, hliník, cín, olovo, nikl nebo různé slitiny zmíněných kovů). Většina povrchových úprav plechů slouží primárně k ochraně před korozi. Podmínky pro tváření takových plechů jsou určeny základním materiálem, ale povrchová úprava není zanedbatelná (je možné zpomalit průběh tváření nebo využít jiná maziva, aby nevznikali praskliny v povrchové vrstvě). [12]

4.2.1 Plechy se zinkovými povlaky

Ocelové plechy jsou povlakovány zinkem za pomoci galvanizace. Zinek je tak metalurgicky spojený s ocelovým podkladem a vytváří na povrchu slitinu železo-zinek a následně vrstvy čistého zinku. Tato povrchová úprava zlepšuje svařitelnost, korozivzdornost a přilnavost pro nátěry. Tyto plechy jsou využívány na vnější a vnitřní karosářské panely. [12]

4.2.2 Plechy s hliníkovými povlaky

Hliníkové povlaky jsou využívány především tehdy, když po plechu vyžadujeme odolnost vůči vysokým teplotám nebo odrazivosti tepla zpátky na zdroj. Tyto plechy kombinují výhodné vlastnosti oceli i hliníku. Nevýhodou těchto plechů je, že při větší vrstvě naneseného hliníku může povlak při tváření praskat což je nepříjemné pro určité aplikace. Tyto plechy jsou používány především pro tlumiče, krytování domácích spotřebičů nebo v topných zařízeních jako krytí. [12]

4.2.3 Plechy s fosfátovými povlaky

Plech s fosfátovými povlaky jsou vyráběny máčením plechu v roztoku kyseliny fosforečné anebo jiných chemikáliích. Povrch je po chemické reakci méně reaktivní a vzniká malá pórovitost, která pomáhá s přijímáním maziv a nátěrů. Jelikož je na povrchu vrstva železitého fosfátu je tento plech vysoce odolný vůči korozi. [12]

4.2.4 Lakované plechy

Lakované plechy jsou natírány/lakovány ještě před tažením, což znamená, že po tažení není potřeba provádět dodatečné operace. Barvy a laky používané pro takový plechy jsou však relativně drahé, protože mají upravené složení tak, aby se zvýšila pružnost, tvrdost a přilnavost lakované vrstvy. Proces tažení je také složitější, protože je třeba dávat pozor na vznik škrábanců nebo prasklin v laku. Nástroje jsou kvůli tomu speciálně upraveny, aby k tomuto nedocházelo. [12]

4.3 Nerezové oceli

Nerezové oceli obsahují kromě běžných legur také chrom, který způsobuje tvorbu vrstvy bohaté na oxid chromu. Odolnost vůči korozi však není jediná výhoda těchto ocelí. Nerezové oceli jsou také pevnější oproti nízkouhlíkovým ocelím, při tváření jsou náchylnější k deformačnímu zpevnění a odolávají vyšším teplotám. Nerezové oceli mají i své nevýhody. Například je více opotřebován nástroj otěrem, mají vyšší hodnotu meze kluzu což zároveň vede i k vyšším hodnotám zpětného odpružení a nižší tepelnou vodivost což znamená, že hůře z nástroje odvádí teplo vzniklé třením. [12; 23]

4.3.1 Austenitické nerezové oceli

Austenitické nerezové oceli jsou nejběžnější nerezové oceli pro tváření a jsou označovány jako řada 300. Mají nejlepší tvárnost ze všech nerezových ocelí. Tyto oceli obsahují kromě chromu také nikl, který ovlivňuje koeficient deformačního zpevnění. U austenitických nerezových ocelí je koeficient deformačního zpevnění (n) 0,45 nebo vyšší což jsou poměrně vysoké hodnoty. Tato ocel má po žhání mez kluzu přibližně 200 MPa po tváření může hodnota meze kluzu dosahovat až 2000 MPa. Deformační zpevnění u austenitických nerezových ocelí je ovlivněno množstvím legur. Čím více legujících prvků přidáme do slitiny tím méně se při tváření zpevňuje. Tyto oceli jsou využívány pro výrobu palivových nádrží, konstrukčních profilech podvozků autobusů a nákladních vozidel nebo částech turbodmychadel. [12]

4.3.2 Feritické nerezové oceli

Feritické nerezové oceli jsou populární zejména v automobilovém průmyslu, protože jsou odolné vůči korozi a teple. Feritické nerezové oceli se označují jako řada 400. Tyto oceli nejsou vhodné pro zpracování za tepla. Hodnota koeficientu deformačního zpevnění je u těchto velice podobná nízkouhlíkovým ocelím (0,20 až 0,24). Problém těchto ocelí spočívá

u tváření větších tloušťek. Tloušťka 2,5 mm je hraniční hodnota a po překročení se začíná objevovat při tažení velice často křehký lom, který je způsobený neschopností této oceli absorbovat větší množství energie. Feritické nerezové oceli se používají pro výrobu lemování dveří a oken železničních vagónů a dalších různých konstrukčních dílů u železničních souprav. [12]

4.4 Hliníkové slitiny

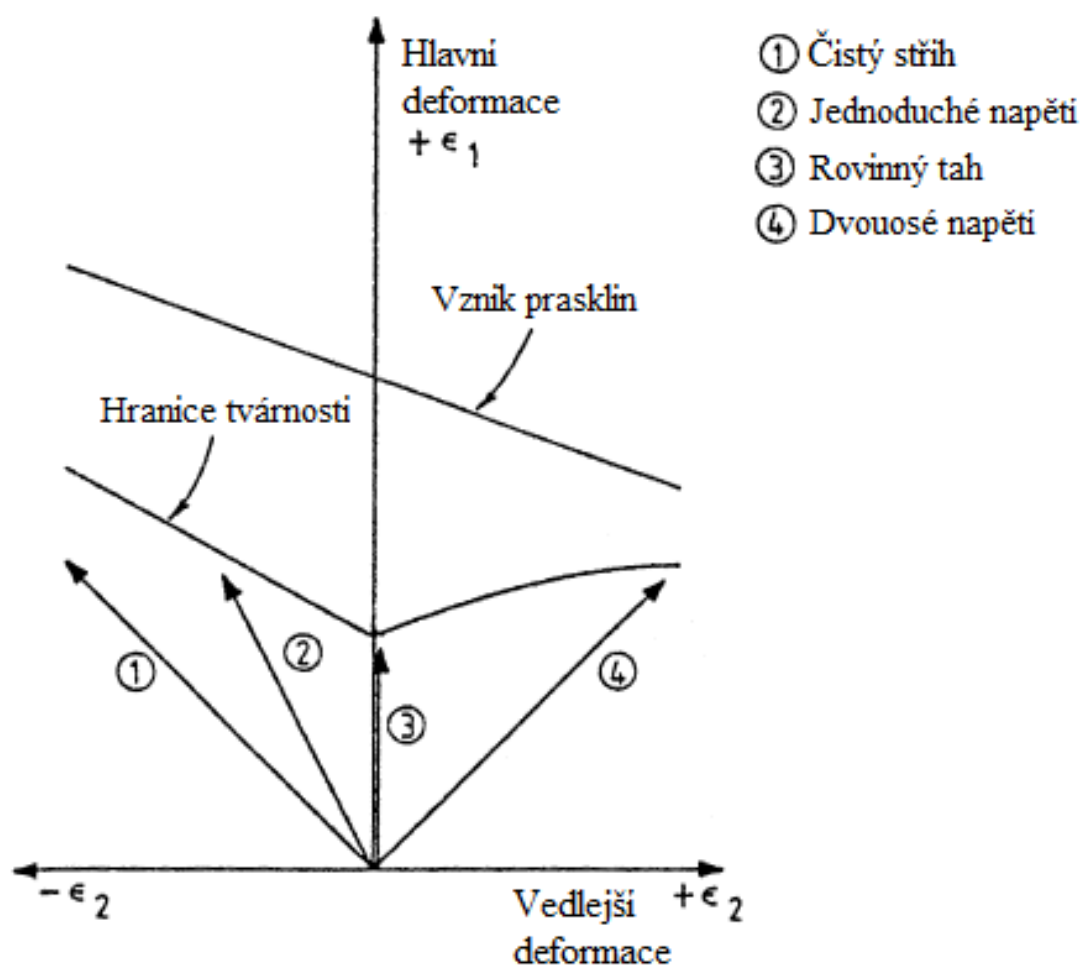
Hliníkové slitiny mají široké rozmezí vlastností a využití. Značí se podle číselného systému ANSI nebo podle názvu s jejich hlavními legujícími prvky. Hliník a jeho slitiny jsou využívány především v automobilovém nebo v leteckém průmyslu, kvůli jejich velké pevnosti relativně k jejich váze (slitiny řady 5000 a 6000). Slitiny hliníku jsou využívány i ve vojenských aplikacích díky jejich vynikajícím balistickým vlastnostem (slitiny řady 7000). Hliník je také využíván v aplikacích, kde je potřeba dosáhnout odrazivosti tepla, které lze dosáhnout leštěním těchto slitin. Jedná se tepelné izolátory různých druhů nádrží nebo výfukových potrubí. Nejvýraznější využitím hliníku lze pozorovat v potravinářství, kde je hliník a jeho slitiny využíván pro výrobu nápojových plechovek (slitiny řady 1000). [12; 23]

4.5 Hořčíkové slitiny

Hořčíkové slitiny jsou využívány jako lehké konstrukční materiály. Hořčíkové slitiny se velice obtížně tvarují za nízkých teplot, avšak při zahřátí mají relativně dobré vlastnosti pro tváření. Tyto slitiny se označují standardizovaným kódem, který udává legovací prvky (první část kódu), procentuální zastoupení těchto legur (druhá část kódu), typ slitiny (třetí část kódu) a následné zpracování (čtvrtá část kódu). Například slitina AZ91E-T6 obsahuje hliník (A) a zinek (Z) přičemž je ve slitině 9 % hliníku a 1 % zinku, jedná se o pátý typ slitiny (E) a prošla umělým stárnutím (T6). Tyto slitiny jsou často využívány tam, kde je důležitá především co nejmenší váha v poměru s pevností dílu (například letecký průmysl nebo kosmickém průmyslu). [12]

5 FLD DIAGRAM

FLD diagram nebo také „Forming limit diagram“ je graf, který zobrazuje dvojrozměrnou reprezentaci maximálních hlavních deformací (ϵ_1) a vedlejších deformací (ϵ_2). Maximální povrchové deformace jsou přitom měřeny před vznikem protažení materiálu nebo trhlin ve všech možných kombinacích tahových a tlakových deformačních drah, aby byly simulovány všechny různé tvářicí operace, kterými plech může procházet. V průběhu let se vyvíjeli nové varianty FLD s různým využitím jako například WFLD („wrinkling forming limit diagram“) od Havranka, který lépe dokáže předpovídat vznik zvrásnění na výtažku nebo SFLD („stress forming limit diagram“) od Arriexu, který není citlivý na průběh napětí. Každý materiál má své jedinečné vlastnosti a svůj vlastní FLD diagram. FLD se primárně sestavuje po sérii testů na materiálu podle toho jaký typ zkoušky je zvolen (Keeler, Hecker, Marciniak, Nakajima atd). [8; 13; 24]

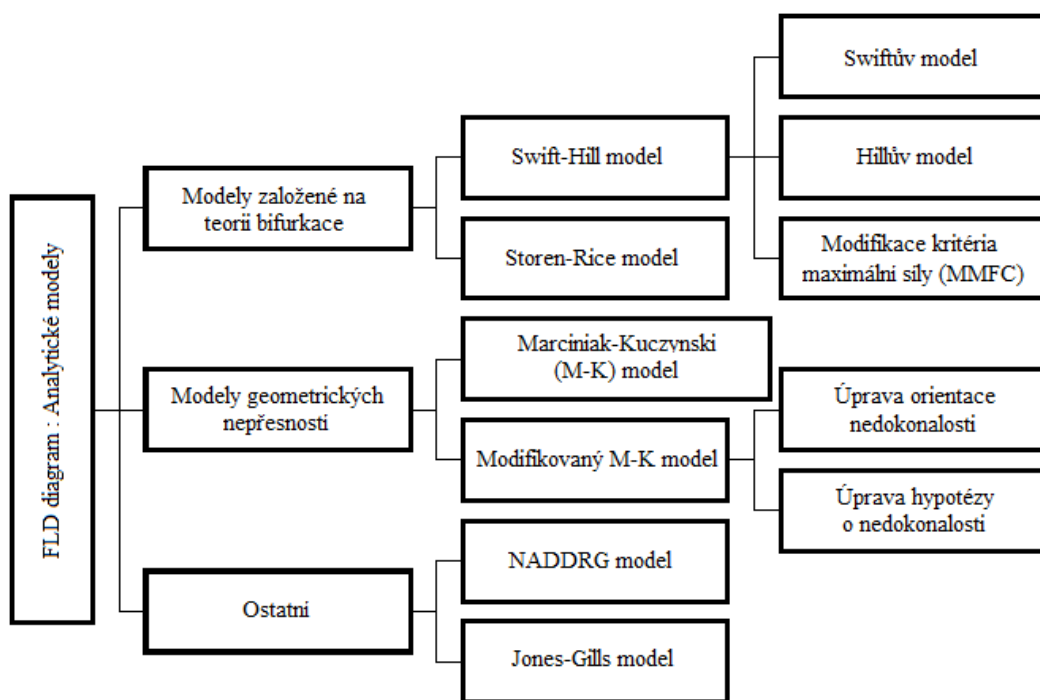


Obrázek 14 – FLD dle Keelera [13]

Tento diagram je dodnes využíván jako nástroj pro porovnání tvářitelnosti různých plechových polotovarů. Často je součástí materiálového listu nebo je možné si jej vyžádat od výrobce. FLD digram je také využíván jako nástroj pro předpověď poruch a defektů, které mohou vznikat v průběhu tvářecích operací. FLD digramu je také využíváno v simulačních softwarech, které se řídí materiálovými modely a využívají FLD jako jednoduchý způsob sledování a zobrazení stavu materiálu při simulaci tváření. [13; 25]

5.1 Analytické určení FLD diagramu

Pro analytické řešení FLD diagramu vzniklo hned několik modelů. Tyto modely se snaží předpovídat chování plechu při operacích tváření. Tyto modely se dělí do tří různých skupin. První skupinou jsou základní modely založené na teorii bifurkace, jedná se o nejstarší analytické modely FLD. Další skupina je založená na modelu geometrických nepřesností. Třetí skupina jsou modely založené na jiných teoriích. [26; 27]



Obrázek 15 – Rozdělení analytického řešení FLD podle teorií [28]

5.1.1 Hillův model

Hillův model je nejstarším modelem pro analytické řešení FLD diagramu. Materiál je v Hillově modelu homogenní. Tento model předpokládá zúžení materiálu právě tehdy když

působí maximální zatížení a prodloužení je rovno nule. Hillův model dokáže popsat pouze levou stranu FLD diagramu. [26; 28]

5.1.2 Swiftův model

Swiftův model počítá s difuzním zúžením materiálu, když proporcionální zatížení dosáhne maximální hodnoty. Swiftův model dokáže popsat pouze pravou stranu FLD diagramu. [26]

5.1.3 Modifikace kritéria maximální síly (MMFC)

Model modifikace kritéria maximální síly (MMFC) vyvinul Hora. MMFC je model vycházející ze Swiftova modelu. Toto kritérium však počítá s koeficientem deformačního zpevnění (n) a dodatečným zpevněním materiálu. [26; 28]

5.1.4 NADDRG model

Tento model byl vyvinut Keelerem. V tomto modelu je FLD kombinace dvou přímek procházející hlavním přetvořením v rovinném stavu napjatosti. Na levé straně FLD přímka svírá úhel 45° s osou hlavní deformace a na pravé straně 20° s osou hlavní deformace. Tento model je na FLD diagramu výše než model podle Swifta a Hilla a všechny experimentální body pod mezní křivkou tváření. [26; 28]

5.1.5 Jones-Gills model

Tento model rozděluje vznik zúžení materiálu do tří fází. První fáze je od začátku zkoušky do dosažení maximálního zatížení, druhý je udržení maximálního zatížení a třetí je zužování materiálu při jednoosém tahu. Tento model dokáže popsat pouze pravou stranu FLD diagramu. [26; 27; 28]

5.1.6 Marciniak-Kuczynsky (M-K) model

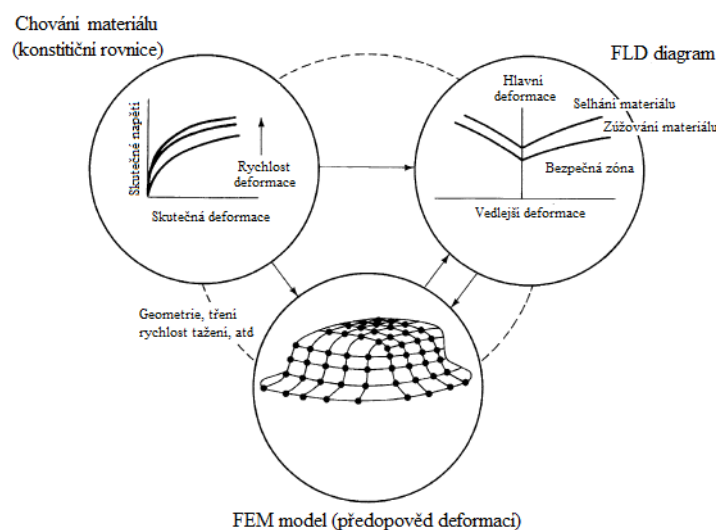
Tento model je založen na geometrické nedokonalosti před deformací. Dokáže popsat obě poloviny FLD diagramu. U tohoto modelu záleží na mezním přetvoření teoretických geometrických parametrů určených předem. Je zde zavedena takzvaná tloušťka defektivní zóny, a právě v této zóně dochází k selhání materiálu. [26; 27; 28]

5.2 Využití FLD diagramu v praxi

Použití diagramu mezních deformací je v praxi nejrealističtější a nejefektivnější způsob, jak odhadnout technologické možnosti výroby součásti a vyhnout se špatnému návrhu. Využitím diagramu mezních deformací může být určen bezpečný rozsah pro hluboké tažení, kritické zóny na výrobku, kde je nejpravděpodobnější vznik zúžení materiálu nebo lomu, úroveň deformace na různých místech výrobku nebo také zjednodušit optimalizaci pracovních podmínek (síla přidržovače, mazání při tažení, tažná síla atd.). [13; 29]

5.2.1 Postup použití FLD v praxi

V praxi je diagram mezních deformací využíván tak, že je připraven výrobek s předepsanou geometrií, rozměry, kvalitou povrchu a materiálem, ze kterého se bude vyrábět. Následně je navržen způsob výroby s výrobním nástrojem včetně procesních podmínek. Po určení těchto parametrů je v dnešní době využít simulační software, který je schopný vypočítat FEM analýzu a zjistit tak maximální deformace součásti. Je třeba také disponovat diagramem mezních deformací pro použitý materiál (simulační softwary mají většinou knihovnu materiálůvých modulů nebo je třeba materiál testovat). Následně je software schopný provést porovnání bodů v FEM síti a zjistit, zda nepřekračují diagram mezních deformací. Pokud výrobek vyhovuje simulaci, přistupuje se k výrobě. Pokud výrobek nevyhovuje je třeba provést změny jako jsou úpravy pracovních podmínek (přidržování plechu, tažná rychlost, mazání), změna materiálu (kvalita materiálu nebo jeho tloušťka) a v krajních případech změnit geometrii výrobku či nástroje (poloměry zaoblení, rozměry atd.). [13; 29]



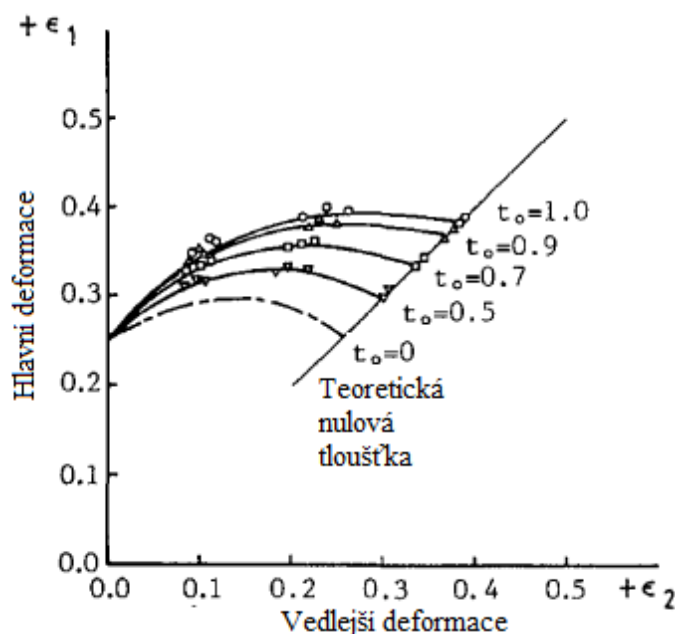
Obrázek 16 – Schéma využití FLD diagramu v praxi [13]

5.3 Faktory ovlivňující FLD digram

FLD diagram je ovlivněný řadou různých faktorů jako je tloušťka tvářeného plechu, vliv změny deformační dráhy, mechanické vlastnosti a další parametry. Změna těchto faktorů může vést k změně celkového tvaru nebo stoupání FLD. [13]

5.3.1 Vliv tloušťky tvářeného pechu

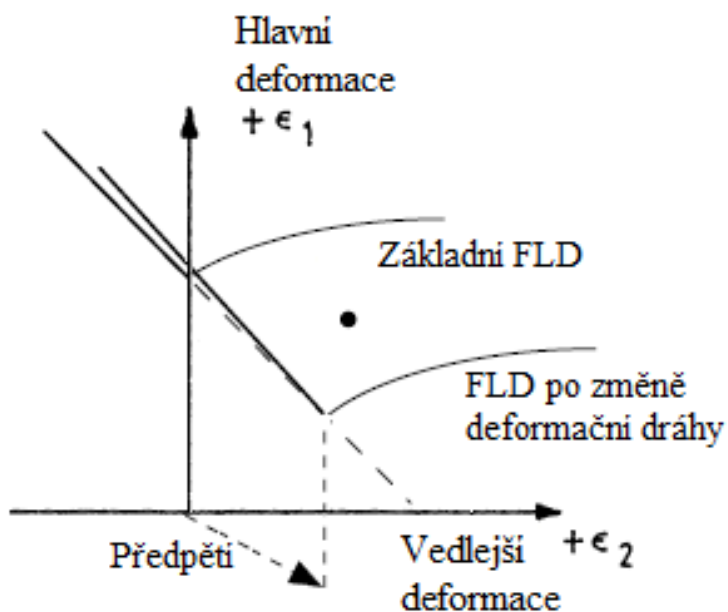
Vliv tloušťky tvářeného plechu je kromě mechanických vlastností a kvality polotovaru největší faktor při sestavení FLD diagramu. V případech, že je výtažek nevyrobitelný v dostatečné kvalitě (vznik protažení) nebo praská při tažení a nelze změnit materiál existuje několik možností, ale nejefektivnější volbou je změna tloušťky materiálu. Čím větší tloušťka tím výše se křivka FLD nachází a nárůst je lineární. [13; 25]



Obrázek 17 – Vliv tloušťky tvářeného plechu na FLD [13]

5.3.2 Vliv změny deformační dráhy

FLD diagram je obvykle určován experimenty, které mají téměř lineární deformační dráhy (poměr hlavních deformací a vedlejších deformací je téměř konstantní). Ve skutečných aplikacích tomu tak často není a deformační dráhy se mohou lišit. Materiály mohou být ve skutečnosti nějak přetvářeny (u plechů se často jedná o operaci válcování, kterou se vyrábí) a to posouvá křivky v FLD diagramu. U tohoto předpětí také záleží na orientaci struktury materiálu. Předpětí v jednom směru hodnoty FLD snižuje (předpětí podél osy ϵ_2) zatím co předpětí v druhém směru hodnoty FLD zvyšuje (předpětí podél osy ϵ_1). [8]



Obrázek 18 – FLD se změnou deformační dráhy [8]

5.3.3 Vliv materiálu

Nehomogenity a vady ve struktuře materiálu mají vliv na křivku meze tvárnosti v FLD diagramu. Za nehomogenity mohou být považovány lokální odchylky v tloušťce plechu, rozdílné chemické složení v různých místech materiálu, rozdíly velikosti zrn nebo jakýkoliv jiný parametr, který je schopen nějakým způsobem snížit mez kluzu materiálu. Obecně lze říct, že čím vyšší má materiál hodnotu meze kluzu, tím výše položenou má křivku meze tvárnosti. Koeficient deformačního zpevnění má také vliv na křivku meze tvárnosti a to takový, že rostoucí hodnoty koeficientu deformačního zpevnění snižují sklon pravého ramena křivky meze tvárnosti. [8]

6 ZKOUŠKY TVÁRNOSTI

Zkoušky tvárnosti jsou důležitou součástí hodnocení mechanických vlastností kovových materiálů. Využívají se pro zjištění schopnosti plechu podstoupit plastické deformace, aniž by došlo k vzniku prasklin nebo porušení materiálu. Zkoušky tvárnosti jsou často využívány v automobilovém, leteckém nebo strojírenském průmyslu, kde jsou plechu a polotovary jím podobné klíčovým konstrukčním prvkem. [13]

6.1 Zkouška tahem

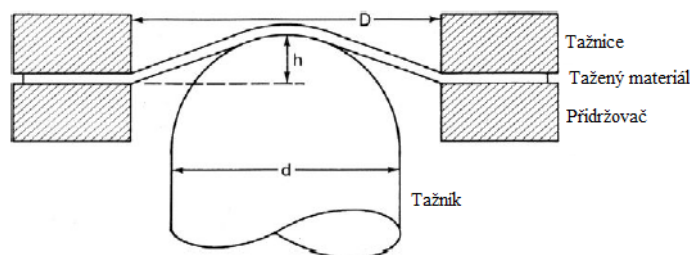
Zkouška tahem nebo také zkouška jednoosého zatížení je používána pro zjištění základních parametrů materiálu, jako je mez pevnosti, mez kluzu a modul pružnosti. Výstupem této zkoušky je křivka, která popisuje závislost napětí na deformaci. Výhodou této zkoušky je možnost využití univerzální zkušebního stroje a jednoduchá výroba vzorků (rozměry vzorků jsou normalizované). Těleso je upnuto do ramen zkušebního stroje a působí na něj napětí pouze v jedné ose. Výsledná křivka je záporná část ε_2 v FLD diagramu. [13]

6.2 Zkoušky hlubokotažnosti

Zkoušky hlubokotažnosti jsou speciální metody používané k zjištění, zda je plech použitelný pro operace hlubokého tažení. Tyto zkoušky slouží hlavně ke správnému výběru materiálu pro danou aplikaci. Mezi tyto zkoušky patří zkouška dle Erichsena, dle Engelhard-Grosse a dle Fukui. [1; 30]

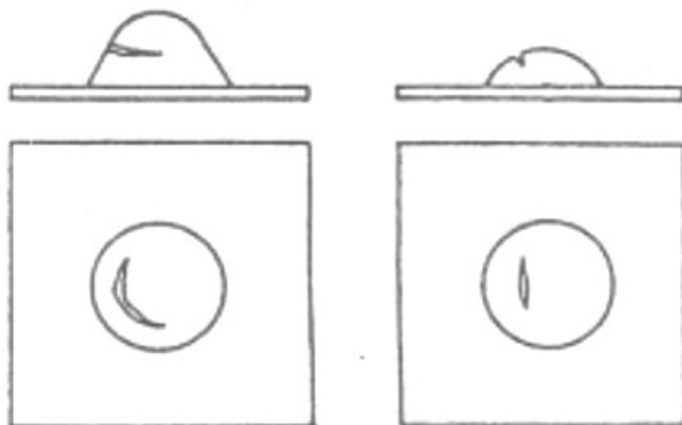
6.2.1 Zkouška dle Erichsena

Zkouška dle Erichsena nebo také zkouška hlubokotažnosti tenkých plechů. Jedná se o zkoušku z poměrně jednoduchým průběhem. Kruhový přístřížek je pevně upnut mezi tažnici a přidržovač o vnitřním průměru 27 mm, následně na něj působí polokulový válcový tažník s průměrem 20 mm. Tento tažník působí předepsanou silou a rychlostí tažení. [13; 31]



Obrázek 19 – Schéma zkoušky dle Erichsena [8]

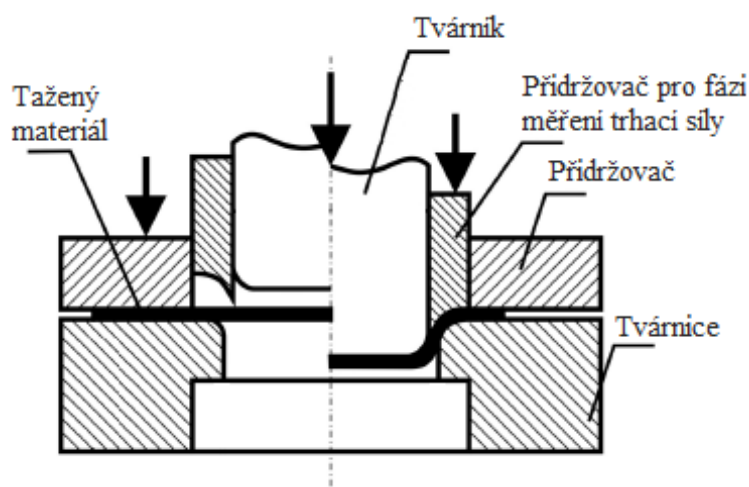
Výsledkem je zjištění, zda lze materiál tažením zpracovávat (měříme hloubku vytaženého kalíšku h). Pokud je materiál vhodný pro hluboké tažení vzniká prasklina po obvodu výtažku (obrázek vlevo), pokud však plech není vhodný k hlubokému tažení vzniká prasklina na čele výtažku (obrázek vpravo). [1; 31]



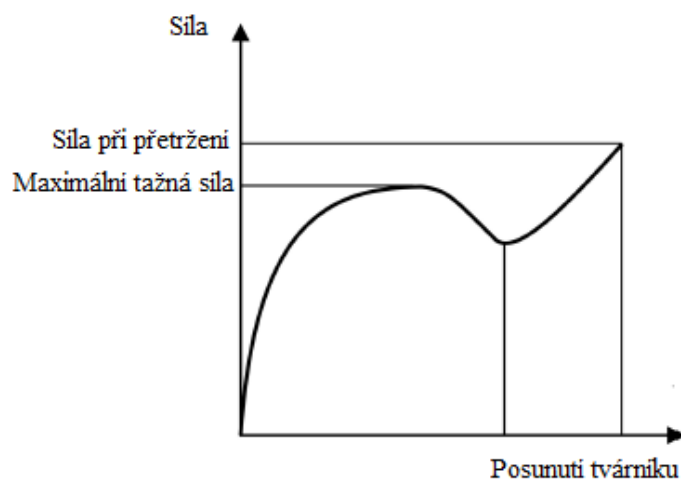
Obrázek 20 – Výsledek zkoušky dle Erichsena [1]

6.2.2 Zkouška dle Engelhard-Grosse

Zkouška dle Engelhard-Grosse je proces, který by měl simulovat proces hlubokého tažení. Zkouška je rozdělena na dvě fáze. První fáze je tažení válcového kalíšku s přírubou, přičemž je měřena maximální dosažená tažná síla (F_{MAX}). Zatím co je polotovár tažen přidržuje jej přidržovač silou 2 kN. V druhé fázi je přitlačen přidržovač silou 20 kN načež je měřena síla, která je potřebná pro přetržení vzorku. Test je prováděn bez mazání. Výsledkem testu je křivka zachycující průběh zkoušky v grafu závislosti použité síly na posunutí tvárníku. [30]



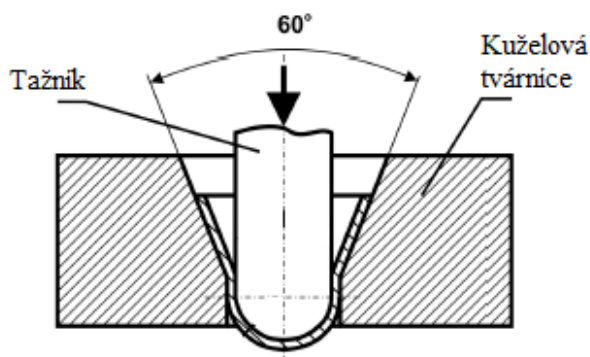
Obrázek 21 – Schéma zkoušky dle Engelhard-Grosse [30]



Obrázek 22 – Výsledek zkoušky dle Engelhard-Grosse [30]

6.2.3 Zkouška dle Fukui

Zkouška dle Fukui nebo také kalíškovací zkouška simuluje tažení plechu. Při této zkoušce je tažen kruhový přístřih do kuželového kalíšku. Při této zkoušce není použit přidržovač ani mazání. Kalíšek je natahován do té doby, než se objeví souvislá průchozí trhlinka. [30]



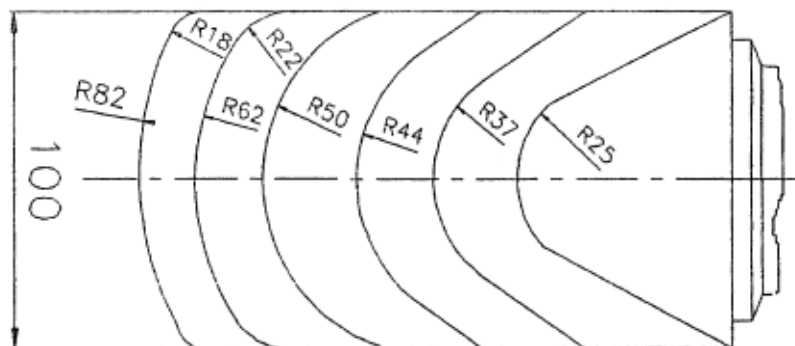
Obrázek 23 – Schéma zkoušky dle Fukui [30]

6.3 Zkoušky pro experimentální určení FLD

Diagram FLD se zjišťuje řadou zkoušek a je vhodné, aby pokrýval co největší část deformačního pole. Jsou proto využity tyto druhy zkoušek: tahová zkouška (jednoosé zatížení), zkouška dle Keelera, zkouška dle Marciniaka, zkouška dle Nakajimi atd. [13]

6.3.1 Zkouška dle Keelera

Zkouška dle Keelera se skládá z užití tvárníků s různými poloměry špičky, tak aby se měnil stav napětí při tažení. Značná nevýhoda této zkoušky je náročnost experimentální práce. Výsledkem je pouze kladná část FLD diagramu a zjištění skutečnosti, že tvar a poloha meze tvárnosti jsou ovlivněny tvarem a poloměry tažníku. [13]



Obrázek 24 – Tvárníky zkoušky dle Keelera [13]

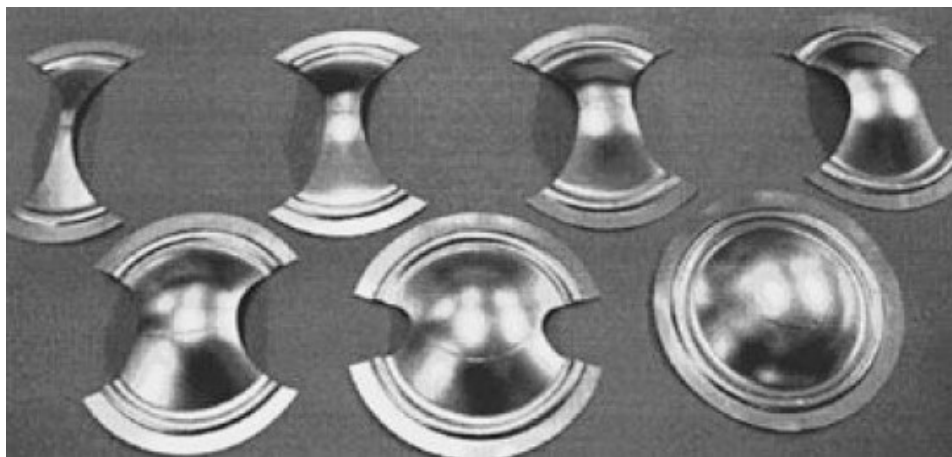
6.3.2 Zkouška dle Heckera

Pro test podle Heckera existuje pouze jeden typ a velikost tvárníku a přístřížku. Proměnnou je u tohoto testu typ maziva použitý pro tažení což vede k získání různých deformačních drah. Výhoda této zkoušky spočívá v jednoduchosti zkušebního zařízení. Nevýhodou je získání pouze kladné oblasti diagram mezních deformací. [13]

6.3.3 Zkouška dle Nakajimi

Tato zkouška spočívá v tažení vzorků různých šířek pomocí polokruhového razníku, kruhové tažnice a přidržovače s brzdou drážkou. Variací šířky vzorku a použitého typu maziva lze získat kladnou i zápornou část diagramu mezních deformací. Tato zkouška je používána jako standardní metoda stanovení FLD pro kovové materiály (dle normy ISO 12 004). Tvar zkušebního vzorku je doporučen v normě. Doporučená délka zkušebního přístříhu je minimálně o 25% větší než průměr tažníku. Průměr tažníku je normou dán a jeho velikost je 100 mm. Vnitřní průměr tažnice a přidržovače je také dán normou a je 105 mm.

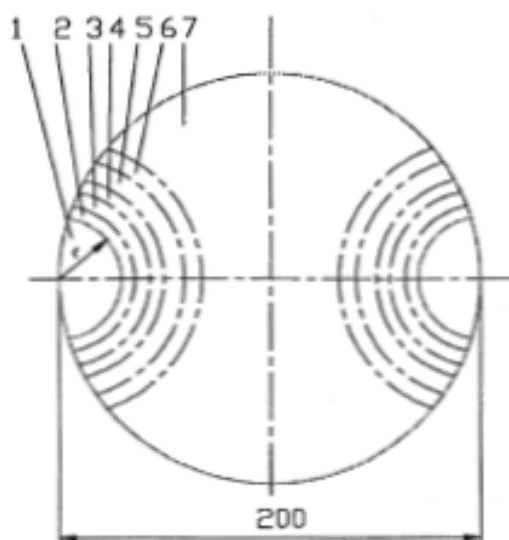
Výhodou této zkoušky je jednoduchost přípravy zkušebních vzorků a zkušebních nástrojů. Hlavní výhodou této zkoušky je pokrytí celého rozsahu diagramu mezních deformací (FLD). U této zkoušky však vzniká zvlnění výtažku a chyby měření způsobené zakřivením tvárníku. [13; 32; 33; 34]



Obrázek 25 – Sada zkušebních těles zkoušky dle Nakajimi [13]

6.3.4 Zkouška dle Haska

Zkouška dle Haska je totožná se zkouškou dle Nakajimi. Jediným rozdíle je Haskův návrh tažení kruhového vzorku s výřezy namísto čtvercového. Tato úprava vede k zabránění vzniku zvlnění na vzorcích za cenu složitější přípravy vzorků. [13; 35]

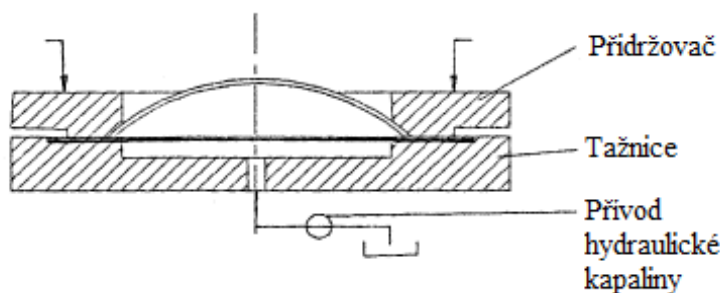


Pozice	1	2	3	4	5	6	7
r (mm)	0	4	5	57,5	65	72,5	80

Obrázek 26 – Zkušební tělesa zkoušky dle Haska [13]

6.3.5 Hydraulická zkoušky vyboulení

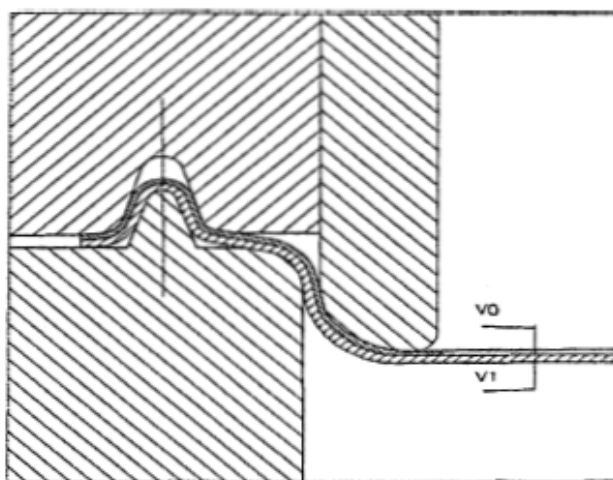
Hydraulická zkouška vyboulení nebo také zkouška dle Olsena využívá pro deformaci plechu hydraulickou kapalinu. Přidržovač má eliptický tvar, a tudíž výtažek také. Výhoda této zkoušky spočívá v absenci tření při tažení, protože tažníkem je v tomto případě hydraulická kapalina. Nevýhodou této zkoušky je možnost získat pouze hodnoty v kladné části ε_2 . [13]



Obrázek 27 – Schéma hydraulické zkoušky vyboulení [13]

6.3.6 Zkouška dle Marciniaka

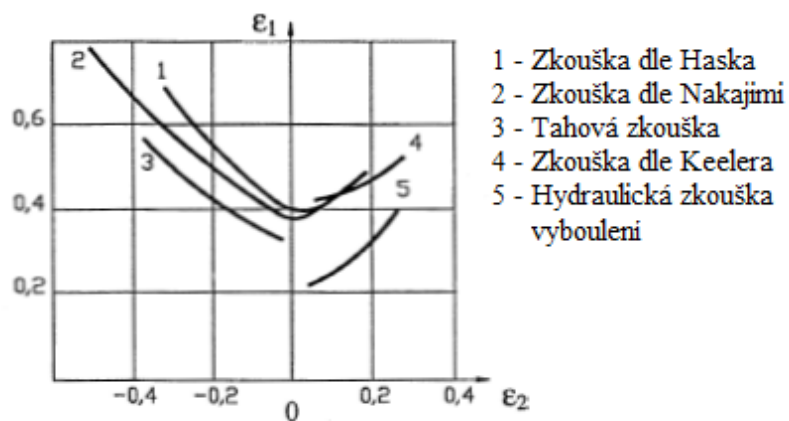
U hlubokého tažení s tažníkem s plochým dnem obvykle dochází k vzniku trhliny v místě spojení dna a válcové stěny. Marciniak tedy navrhl zkoušku tažnosti, které simuluje přesně tento jev. Pro tuto zkoušku je použit dutý tažník a tažnice s přidržovačem a brzdou drážkou. Prasklina tudíž vzniká na rovinném dně součásti, čímž je eliminována chyba měření způsobená zakřivením součásti. Nevýhodou této zkoušky jsou složité tvary tvárníku, tvárnice a přidržovače což vede k prodražení zkušebního zařízení. Tato zkouška popisuje pouze kladnou část ε_2 . [13; 34; 35; 36]



Obrázek 28 – Schéma zkoušky dle Marciniaka [13]

6.3.7 Porovnání různých zkoušek

Různé zkoušky mají rozdílné výsledky. Některé jsou schopné popsat pouze část diagramu mezních deformací. Komplexní popis materiálu do FLD diagramu (jak v kladném směru, tak v záporném) udávají zkoušky dle Haska nebo Nakajimi. Na obrázku č.28 jsou zakresleny některé z těchto zkoušek pro ilustraci. [13]



Obrázek 29 – Porovnání různých druhů zkoušek
v FLD diagramu [13]

7 SIMULACE PROCESU HLUBOKÉHO TAŽENÍ

Simulace procesu hlubokého tažení je podstatná z důvodu kontroly výrobitelnosti součástí, zjednodušení optimalizace výroby, robustnosti návrhu výroby a celkového plánování výroby. Simulační programy pracují na základě metody konečných prvků. Program potřebuje pro výpočet zadat vhodné vstupní informace. Je tudíž ideální vytvořit virtuální dvojče výrobních zařízení, použít vhodné materiálové modely a tak dále, aby byla simulace co nejpřesnější. Simulace však nedokáže nahradit reálné zavádění procesu výroby, je schopná tento proces urychlit a popřípadě testovat změny na procesu. Výstupy simulace jsou posouzení návrhu dílu, vhodnosti vybraného materiálu, konstrukce nástroje, volby procesních podmínek a konzistentnosti výroby (udržitelnost výroby i přes výrobní odchylky). [13; 37; 38]

7.1 Zadání vstupních dat

Pro simulaci procesu hlubokého tažení je třeba zadat řadu vstupních dat. První z těchto vstupních dat je 3D CAD data. CAD data by měla odpovídat aktuálnímu návrhu součásti a v modelu by se neměly nacházet chyby jako jsou neuzavřené hrany atd. Je vhodné, aby byl model orientovaný tak jako při výrobě. Tyto data jsou následně simulačním programem převedeny na FEM data, s kterými je program schopný pracovat. Program také potřebuje materiálový model, který zahrnuje Youngův modul materiálu, Poissonovo číslo, mez kluzu materiálu, tažnost, křivky zpevnění materiálu a křivky mezní tvářitelnosti. Dalšími vstupními daty je již zmíněné digitální dvojče výrobního zařízení s všemi parametry. Následuje řada dalších parametrů jako je tvar polotovaru a koeficient tření. [13; 36]

7.1.1 Okrajové podmínky

Po zadání všech předchozích dat je třeba určit externí okrajové podmínky jako je omezení pohybu polotovaru, maximální a minimální zdvih výrobního zařízení, symetrie (ať už výrobku či nástroje) pro ulehčení výpočtu atd. Tyto data ještě více přibližují výsledek simulace realitě. [13; 36]

7.2 Výstupní data simulace

Simulace se využívají především, protože dle výstupních dat může být určeno, zda vzniká při tváření nějaký problém nebo je možné podle nich optimalizovat proces. Hlavním problémem při tažení plechů může být vznik ztenčení stěny nebo prasklin. Simulační

softwary jsou schopny určit v jakém místě na výrobku je stěna ztenčena nebo praská. Je pro to využit FLD diagram s barevnou stupnicí, která rozděluje FLD do několika oblastí (oblast zesílení, oblast stlačení, oblast bez přetvoření, bezpečná oblast, oblast rizika praskání, oblast nadměrného ztenčení a oblast prasknutí). Pokud simulace určí, že je součást nevýrobitelná je možné změnit nejprve procesní podmínky a zkusit znovu provést simulaci. Pokud však simulace určí, že je nemožné součást vyrobit je přistoupeno ke změně geometrie dílu. V krajních případech je potřeba změnit technologii výroby, protože součást není vhodná pro tažení.

Simulaci lze také využít pro optimalizaci. Jednou z možností je optimalizace přístřihu materiálu pro redukci množství odpadu. Dále je možné optimalizovat sílu tažníku nebo síly na přidržovači. Simulace také dává možnost určení robustnosti výroby. Po zadání výrobních odchylek jako jsou tolerance tloušťky plechu, tolerance mechanických vlastností, tolerance vzájemné polohy tažníku a přístřížku a mnoho dalších můžeme říct, zda je návrh výroby robustní nebo ne.

Je nutno podotknout, že simulační softwary jsou pouze nástroj „odhad“ výsledků tažení. Simulace počítají s různými proměnnými, avšak nikdy nedokážou dokonale zachytit reálné dění při technologickém procesu. Simulace jsou tudíž schopné určit proveditelnost výroby ale nikdy nezaručují výrobitelnost. [13]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

8 CÍLE PRAKTICKÉ ČÁSTI DIPLOMOVÉ PRÁCE

Cíle dle zadání diplomové práce:

1. Výběr plechů pro hluboké tažení.
2. Provedení výroby dílů s různými podmínkami hlubokého tažení plechů.
3. Provedení měření mechanických vlastností.
4. Vyhodnocení naměřených hodnot.

Cílem praktické části této diplomové práce je pohled na tažení plechu z hlediska technologických podmínek. Pro tuto práci budou zvoleny 3 druhy vysokopevnostních plechů. Následně budou tyto plechy děleny na testovací tělesa.

Tyto tělesa budou podrobena zkouškám mikro-mechanických vlastností a třem druhům zkoušek hlubokého tažení na testovacím zařízení Zwick/Roell BUP 600. Jedná se o zkoušku dle Erichsena také známá jako zkouška hloubením dle normy ČSN EN ISO 20482. Zkouška dle Nakajimi také známá jako zkouška pro konstrukci křivky mezní tvářitelnosti FLC (Forming Limit Curve) dle normy ČSN EN ISO 12004. Zkouška FLC bude provedena ve variantě bez brzdné drážky a s brzdou drážkou.

V první řadě budou určeny vhodné rozmezí jednotlivých zkoumaných technologických podmínek. Bude se jednat o zkoumání vlivu vhodné přídržovací síly na přídržovači, rychlosti tažení a vliv aplikace maziva při procesu (variace materiál bez aplikace maziva, materiál s aplikovaným mazivem pouze na straně tažníku a materiál s mazivem aplikovaným na obou stranách polotovaru).

Výsledky zkoušek budou stručně a přehledně vyhodnoceny a bude popsán vliv jednotlivých zkušebních parametrů na proces tažení.

Dále bude provedena simulace tvářecího procesu při zkouškách. Pro tvorbu této simulace bude využit software Autoform R8. Výsledná simulace bude porovnána s reálnými výsledky měření.

Poslední kapitola praktické části se bude zabývat hodnocením, zda byly dosaženy všechny určené cíle v praktické části a rychlým shrnutím výsledků.

9 VÝBEŘ MATERIÁLŮ PRO TAŽENÍ

Pro tuto diplomovou práci byly vybrány tři materiály, z kterých byly vyválcovány vysokopevnostní plechy. Plechy z těchto materiálů jsou prodávány pouze ve svitcích. Tyto plechy byly poskytnuty firmou PWO Czech Republic a.s. z Valašského Meziříčí, která tyto plechy využívá především v automobilovém průmyslu. V automobilovém průmyslu je vyvíjen tlak na váhu dílů, a proto se začínají využívat vysokopevnostní plechy, které poskytují výrazně vyšší mechanické vlastnosti v poměru k váze. Problém těchto plechu je však ve faktu, že mají výrazně horší tažnost než plechy obyčejných jakostí.

9.1 Příprava testovacích vzorků

Plechy byly dodány ve formě tabulí odstřižených ze svitků přímo ve výrobě. Rozměry tabulí se pohybovali přibližně kolem 520x620 mm. Tabule byly děleny na zkušební tělesa o rozměrech 120x120 mm. Pro dělení tabulí byly využity pákové nůžky.

9.2 Ocel HCT980X

Jedná se o vysokopevnostní ocel označovanou také je DP (dual-phase) ocel. Ocel v mikrostruktuře obsahuje ferit tak martenzit a zbytkový austenit. Tato ocel se vyznačuje vysokou pevností v tahu, dobrou tvářitelností za studena a relativně vysokým koeficientem zpevnění po tváření za studena. Mez kluzu ($R_p 0,2$) oceli HCT980X je 600-750 MPa a mez pevnosti v tahu (R_m) 980-1130 MPa (tyto mechanické vlastnosti byly měřeny na tělesech vyřezaných ve směru válcování plechu). Tato ocel je využívána především v průmyslových aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost, schopnost tváření za studena a nízká váha. Ocel HCT980X je využívána především v automobilovém průmyslu. Plech z oceli HCT980X byl válcován za studena na tloušťku 0,8 mm.

Tabulka 2 – Chemické složení oceli HCT980X

Označení oceli	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al	Cr+Mo max.	Nb+Ti max.	V max.	B max.	Cu max.
HCT980X	0,115	0,650	2,350	0,040	0,005	0,015- 0,060	1,000	0,120	0,060	0,003	0,150

(Hodnoty v tabulce jsou procentuální zastoupení jednotlivých prvků podle hmotnosti)

9.3 Ocel HCT980XG

Jedná se o vysokopevnostní ocel označovanou také je DP (dual-phase) ocel. Ocel v mikrostruktuře obsahuje feriticko-martenzitickou strukturu se zbytkovým austenitem. Tato ocel se vyznačuje vysokou pevností v tahu, dobré tvářitelnosti za studena a relativně vysoký koeficient zpevnění po tváření za studena. Mez kluzu ($R_p 0,2$) oceli HCT980XG je 700-850 MPa a mez pevnosti v tahu (R_m) 980-1130 MPa (tyto mechanické vlastnosti byly měřeny na tělesech vyřezaných ve směru válcování plechu). Tato ocel je využívána především v průmyslových aplikacích, kde je vyžadována vysoká pevnost, schopnost tváření za studena a nízká váha. Ocel HCT980XG je využívána především v automobilovém průmyslu. Plech z oceli HCT980XG byl válcován za studena na tloušťku 0,8 mm.

Tabulka 3 – Chemické složení oceli HCT980XG

Označení oceli	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al	Cr+Mo max.	Nb+Ti max.	B max.	Cu max.
HCT980XG	0,230	1,000	2,900	0,050	0,010	0,015- 1,000	1,400	0,150	0,005	0,200

(Hodnoty v tabulce jsou procentuální zastoupení jednotlivých prvků podle hmotnosti)

9.4 Ocel HC420LA

Je nízkouhlíková ocel s vysokou tvárností, obrobitelností, dobré odolnosti vůči opotřebení a relativně vysoké pevnosti v tahu v rámci nízkouhlíkových ocelí. Mez kluzu ($R_p 0,2$) oceli HCT980X je 400-500 MPa a mez pevnosti v tahu (R_m) 470-590 MPa (tyto mechanické vlastnosti byly měřeny na tělesech vyřezaných ve směru válcování plechu). Tato ocel je využívána zejména pro výrobu plechů válcováním za studena nebo za tepla do automobilového průmyslu. Plech z oceli HC420LA byl válcován za studena na tloušťku 0,5 mm.

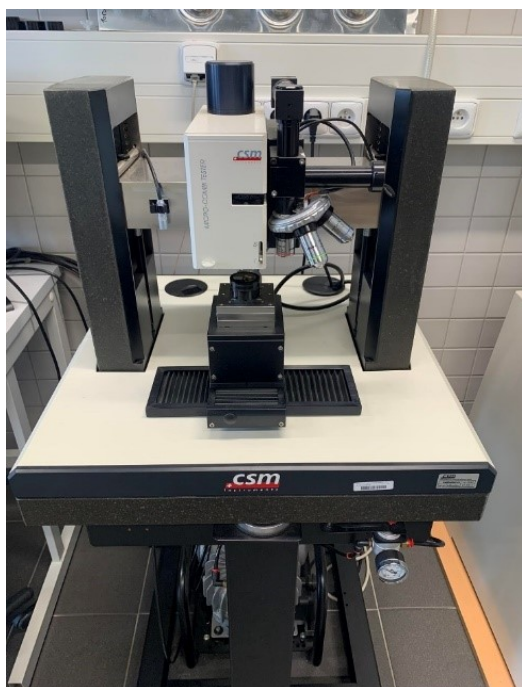
Tabulka 4 – Chemické složení oceli HC420LA

Označení oceli	C max.	Si max.	Mn max.	P max.	S max.	Al min.	Cr+Mo max.	Nb max.	Ti max.
HC420LA	0,100	0,500	1,600	0,025	0,025	0,015	1,400	0,090	0,150

(Hodnoty v tabulce jsou procentuální zastoupení jednotlivých prvků podle hmotnosti)

10 MĚŘENÍ MIKRO-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ PLECHU

U vybraných materiálů byly měřeny materiálové vlastnosti. Toto měření bylo provedeno na přístroj MicroCombi Tester (MCT³) od společnosti CSM (dnes už skupina Anton-Paar). Testování bylo prováděno v souladu s normou ČSN EN ISO 14577 (instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů). Cílem měření je zjištění následujících parametrů: vtisková tvrdost (H_{IT}), tvrdost dle Vickerse (HV_{IT}), vtiskový modul (E_{IT}) a maximální hloubka vpichu (H_{MAX}).



Obrázek 30 – MicroCombi Tester (MCT³) od společnosti CSM

10.1 Procesní parametry zkoušky

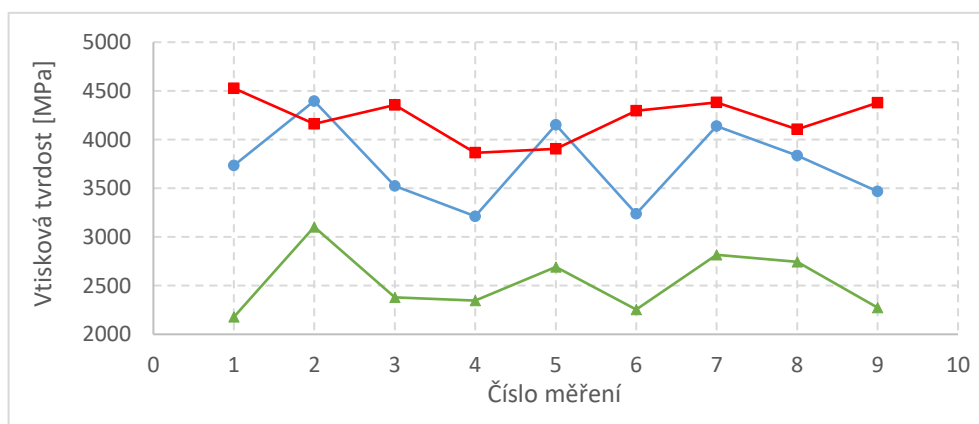
Měření bylo provedeno metodou DSI (Depth Sensing Indentation) a vyhodnocení bylo provedeno metodou Oliver & Pharr. Princip metody DSI je založen na schopnosti zařízení průběžně zaznamenávat změny hloubky pronikání indentoru v závislosti na postupném zvyšování nebo snižování zatížení během celého cyklu zatěžování a odlehčování. Nástrojem při této metodě měření je diamantové vnikací těleso (indentor) ve tvaru čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136° . Zatížení aplikované na materiál je 1 N, rychlosti zatěžování a odlehčování je 2 N/min. Výdrž na maximálním zatížení byla nastavena na 12 s. Poissonův poměr je 0,3.

10.1.1 Výsledky a vyhodnocení měření vtiskové tvrdosti (H_{IT})

Vtisková tvrdost představuje schopnost materiálu odolávat pronikání cizího tělesa do svého povrchu, přičemž se hodnotí jeho rezistence vůči vzniku trvalých (plastických) deformací.

Tabulka 5 – Naměřené hodnoty pro vtiskovou tvrdost (H_{IT})

H_{IT} – Vtisková tvrdost [MPa]			
Číslo měření	Materiál		
	Ocel HCT980X	Ocel HCT980XG	Ocel HC420LA
1	3732,41	4527,00	2177,21
2	4395,28	4162,40	3102,90
3	3521,86	4355,99	2379,89
4	3212,57	3863,68	2345,67
5	4152,31	3904,72	2690,30
6	3236,08	4295,36	2254,67
7	4137,34	4383,04	2817,90
8	3836,31	4105,79	2743,60
9	3468,32	4377,11	2274,56
Průměr	3743,61	4219,45	2531,86
Směrodatná odchylka	421,31	227,05	317,10



Obrázek 31 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro vtiskovou tvrdost (H_{IT})

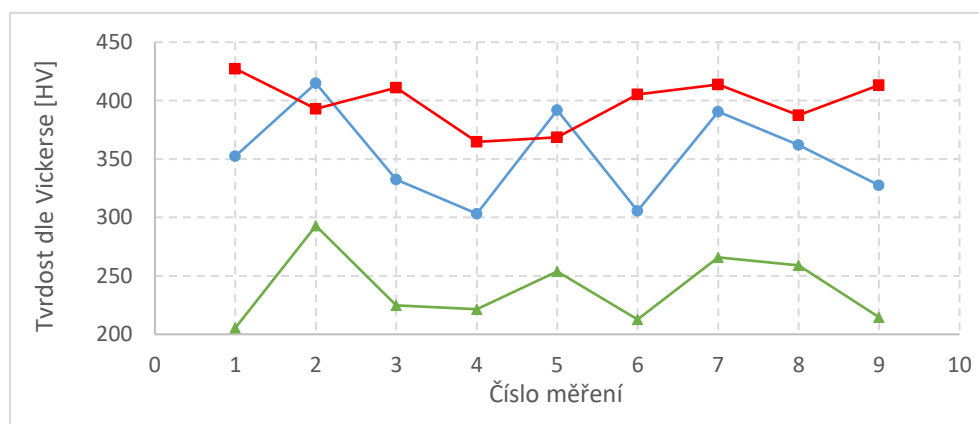
Vtisková tvrdost je průměrně nejvyšší u materiálu HCT980XG a to 4219,45 MPa. Materiál HCT980X má menší vtiskovou tvrdost 3743,61 MPa, tento materiál má také největší rozdíly v jednotlivých naměřených hodnotách a nejvyšší směrodatnou odchylku což znamená, že buď nastal problém při válcování materiálu nebo materiál není příliš homogenní. Materiál HC420LA je ze všech testovaných materiálů nejméně odolný. Hodnota vtiskové tvrdosti je pro materiál HC420LA 2531,86 MPa.

10.1.2 Výsledky a vyhodnocení měření tvrdosti dle Vickerse (HV_{IT})

Jedná se o adaptaci běžného měření tvrdosti dle Vickerse. Plocha vtisku se odhaluje z průběhu zatěžování, nikoliv opticky.

Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pro tvrdost dle Vickerse (HV_{IT})

HV_{IT} – Tvrdost dle Vickerse [HV]			
Číslo měření	Materiál		
	Ocel HCT980X	Ocel HCT980XG	Ocel HC420LA
1	352,29	427,29	205,50
2	414,85	392,87	292,87
3	332,41	411,14	224,63
4	303,22	364,68	221,40
5	391,92	368,55	253,93
6	305,44	405,42	212,81
7	390,51	413,70	265,97
8	362,09	387,53	258,96
9	327,36	413,14	214,69
Průměr	353,34	398,26	238,97
Směrodatná odchylka	39,77	21,43	29,93



Obrázek 32 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro tvrdost dle Vickerse (HV_{IT})

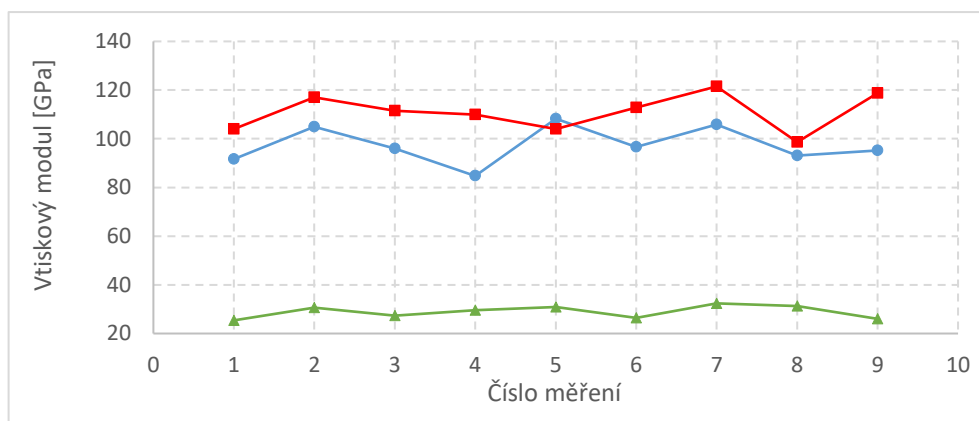
Podobně jako u předchozí veličiny můžeme vidět v grafickém zobrazení, že materiál HCT980XG je nejtvrdší, průměrně 398,26 HV, materiál HCT980X je o něco měkkší a průměrná hodnota tvrdosti dle Vickerse u něj dosahuje 353,34 HV. Materiál HC420LA opět dosahuje nejnižších hodnoty tvrdosti a to pouze 238,97 HV. Materiál HCT980XG je tedy o 11,3 % tvrdší než HCT980X a o 40 % tvrdší než HC420LA.

10.1.3 Výsledky a vyhodnocení měření vtiskový modul (E_{IT})

Vtiskový modul charakterizuje pružnou odezvu materiálu při zatěžování a odlehčování podle Oliver-Pharrovovy metody. Podobný Youngovu modulu, avšak vtiskový modul se měří indentací což znamená, že vliv tvaru nástroje má vliv na výsledky.

Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro vtiskový modul (E_{IT})

E_{IT} – Vtiskový modul [GPa]			
Číslo měření	Materiál		
	Ocel HCT980X	Ocel HCT980XG	Ocel HC420LA
1	91,67	104,06	25,40
2	104,88	116,97	30,64
3	96,01	111,45	27,37
4	84,75	109,96	29,61
5	108,24	103,95	30,90
6	96,69	112,81	26,45
7	105,80	121,49	32,38
8	93,09	98,65	31,32
9	95,21	118,79	26,05
Průměr	97,37	110,90	28,90
Směrodatná odchylka	7,61	7,59	2,60



Obrázek 33 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro vtiskový modul (E_{IT})

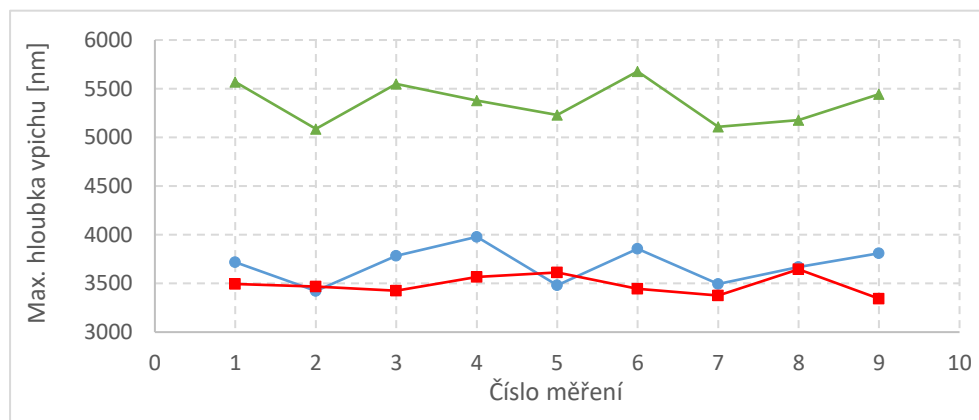
Nejvyšším vtiskovým modulem disponuje materiál HCT980XG, který dosahuje průměrné hodnoty 110,90 GPa. Materiál HCT980X má přibližně o 12,2 % menší průměrnou hodnotu a to 97,37 GPa. Materiál HC420LA má, co se týče vtiskového modulu o 73,9 % menší hodnotu a to pouhých 28,9 GPa.

10.1.4 Výsledky a vyhodnocení měření maximální hloubky vpichu (H_{MAX})

Jedná se o maximální dosaženou hloubku vpichu během zatěžovací části zkoušky. Důležitá hodnoty pro vyhodnocení správného kontaktu mezi indentorem a zkoušeným materiálem.

Tabulka 8 – Naměřené hodnoty pro maximální hloubku vpichu (H_{MAX})

H_{MAX} – Maximální hloubka vpichu [nm]			
Číslo měření	Materiál		
	Ocel HCT980X	Ocel HCT980XG	Ocel HC420LA
1	3716,58	3494,86	5567,35
2	3422,73	3467,94	5087,00
3	3782,46	3424,51	5550,17
4	3978,47	3564,98	5377,15
5	3480,80	3611,02	5229,33
6	3854,30	3444,88	5677,39
7	3493,91	3374,68	5109,90
8	3669,83	3645,02	5178,94
9	3808,58	3343,32	5443,75
Průměr	3689,74	3485,69	5357,89
Směrodatná odchylka	189,60	103,55	216,24



Obrázek 34 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro maximální hloubku vpichu (H_{MAX})

Maximální hloubka vpichu je oproti ostatním testům v této sadě nejvyšší u materiálu HCT980XG. Jelikož je tento materiál nejtvrdší dal se tento výsledek očekávat. Hrot pronikl průměrně do hloubky 3485,69 nm. U lehce měkčí HCT980X hrot pronikl do průměrné maximální hloubky 3689,74 nm. U nejměkčího materiálu se dalo předpokládat nejvyšší průměrnou hodnotu průniku hrotu a to 5357,89 nm což je o 27 % hlouběji jak u HCT980XG.

11 POPIS MĚŘÍCIHO ZAŘÍZENÍ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ

Pro potřeby méj diplomové práce byl využit testovací stroj od firmy Zwick/Roell BUP 600. Jedná se zkušební zařízení pro tváření plechů. BUP je modulární zařízení s bajonetovým mechanismem upínání zkušebních nástrojů pro různé druhy zkoušek tváření plechů jako je zkouška hloubením, zkouška cípavosti, zkouška rozšiřováním otvoru a křivka mezní tvářitelnosti. BUP 600 dokáže vyvinout maximální tažnou sílu 600 kN a maximální přidržovací sílu 600 kN. Maximální velikost zkoušeného materiálu je $\varnothing 250$ mm a maximální tloušťka je 10 mm. Rychlost tažení tohoto zařízení je 0,01 až 17 mm/s. Maximální zdvih tažníku je 120 mm. [39]



Obrázek 35 – Testovací zařízení BUP 600 [39]

12 POPIS POUŽITÝCH NÁSTROJŮ PRO HLUBOKÉ TAŽENÍ

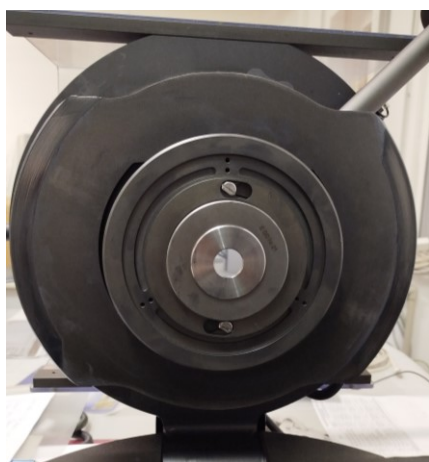
Jednotlivé zkoušky provedené při vypracování této práce jsou zkoušky normalizované. Nástroje mají tudíž předem určené rozměry. Jelikož byly provedeny 3 typy zkoušek, a to zkoušky dle Erichsena, zkoušky dle Nakajimi (bez brzdné drážky a s brzdou drážkou). Každá z těchto zkoušek tedy vyžadovala změnu konfigurace samotného zkušebního zařízení. Tato změna se provádí výměnou tažníku, tažnice a přidržovače.

12.1 Zkouška dle Erichsena

Zkouška dle Erichsena je specifikována v normě ČSN EN ISO 20482 nebo také zkouška hloubení. Tato zkouška je využívána především pro určení vhodnosti materiálu pro proces hlubokého tažení. Tato zkouška je spíše porovnávací a v případě této práce bylo provedeno menší množství měření, aby byla zjištěna vhodnost materiálu pro hluboké tažení. Norma specifikuje využití kulového tažníku o průměru 15 mm, tažnice o průměru 18 mm a přidržovače o vnitřním průměru 21 mm.

12.1.1 Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Erichsena

Změna konfigurace BUP 600 je relativně jednoduchá díky bajonetovému mechanismu upínání tažnice a přidržovače. Nejprve je vyměněna tažnice, která je uchycena v odklápěcí polovině zařízení (Obrázek 36). Následně byl namontován tažník za pomoci šroubů. Jako poslední byl vyměněn i přidržovač (Obrázek 37).



Obrázek 36 – Tažnice pro zkoušku dle Erichsena



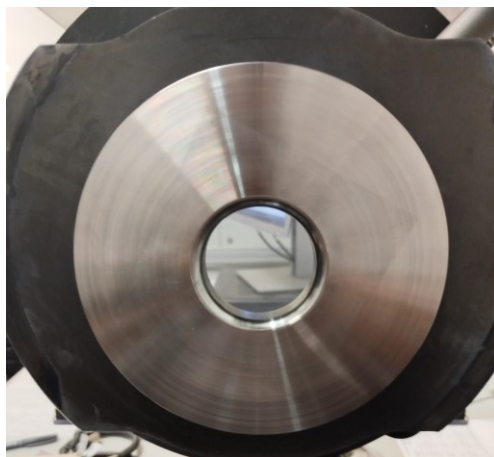
Obrázek 37 – Přidržovač pro zkoušku dle Erichsena

12.2 Zkouška dle Nakajimi

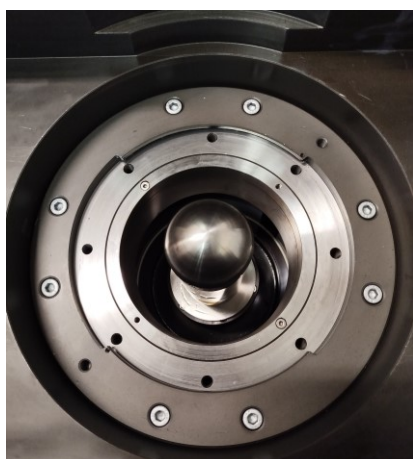
Zkouška dle Nakajimi je specifikována v normě ČSN EN ISO 12004 nebo také zkouška pro konstrukci křivky mezní tvárnosti FLC (Forming Limit Curve). Tato zkouška má dvě různé formy. Jednou formou je zkouška bez brzdné drážky a druhou je forma zkoušky s brzdou drážkou. Jediný rozdíl mezi těmito formami zkoušky je právě vyfrézovaná drážka na tvárnici a přidržovači. Norma specifikuje využití hemisférického tažníku o průměru 60 mm a tažnici s přidržovačem o vnitřním průměru 62 mm se zaoblením hrany.

12.2.1 Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky

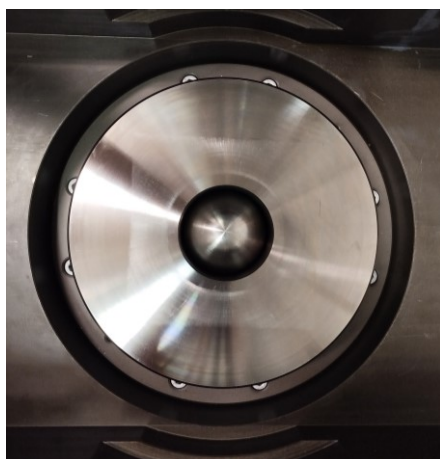
Zkouška dle Nakajimi bez brzdny drážky má hladkou tažnici s přidržovačem, a tudíž neklade materiálu výrazný odpor. Materiál se na hladkém povrchu snadněji přesouvá. Materiál se tedy vtahuje mnohem jednodušeji, než je tomu tak u zkoušky s brzdou drážkou a ovlivňuje tak částečně přesnost naměřených výsledků.



Obrázek 38 – Tažnice pro zkoušku
dle Nakajimi bez brzděné drážky



Obrázek 39 – Tažník pro zkoušku
dle Nakajimi



Obrázek 40 – Přidržovač pro zkoušku
dle Nakajimi bez brzděné drážky

12.2.2 Konfigurace BUP 600 pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou

Zkouška dle Nakajimi s brzdou drážkou zabraňuje výraznému vtahování materiálu. Právě z tohoto důvodu je zkouška s brzdou drážkou přesnější, co se týče výsledků. Brzdá drážka je z velké části vytvořena přitlačením přidržovače k tažnici, což má za následek vylisování drážky do zkušebního tělesa.



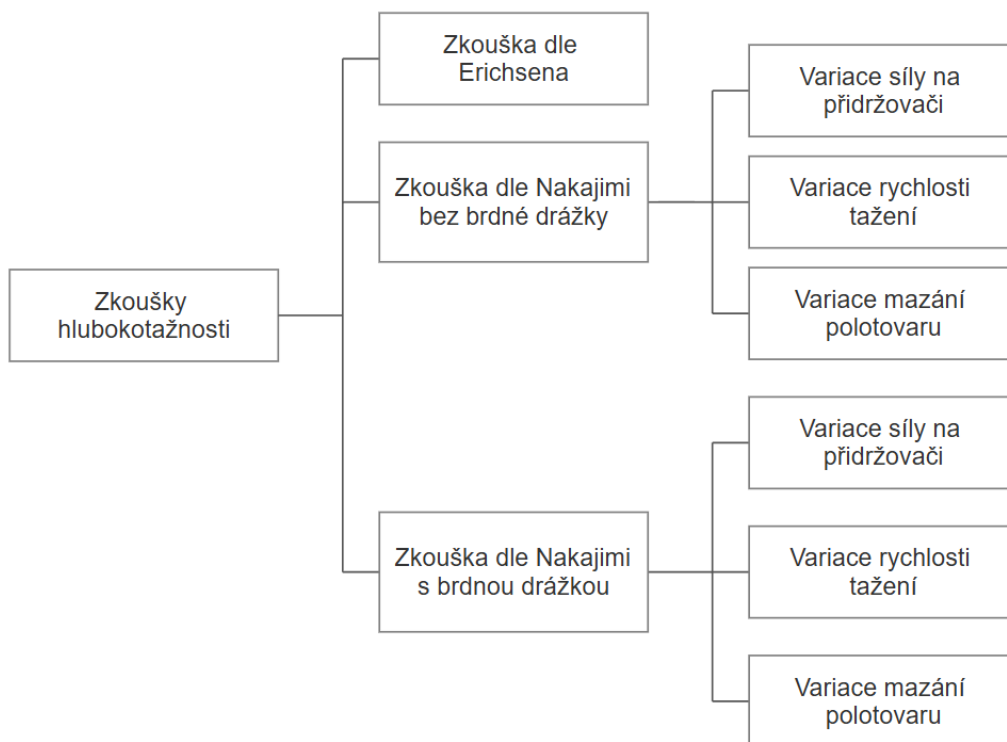
Obrázek 41 – Tažnice pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou



Obrázek 42– Přidržovač pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou

13 VÝSLEDKY ZKOUŠEK HLUBOKÉHO TAŽENÍ

V této kapitole budou prezentovány naměřené hodnoty z testovacího zařízení Zwick/Roell BUP 600. Jak už bylo v předešlých kapitolách zmíněno, byly využity tři typy zkoušek. Zkouška dle Erichsena, zkouška dle Nakajimi bez brzdné drážky a zkouška dle Nakajimi s brzdou drážkou.



Obrázek 43 – Diagram provedených zkoušek

13.1 Zkouška dle Erichsena

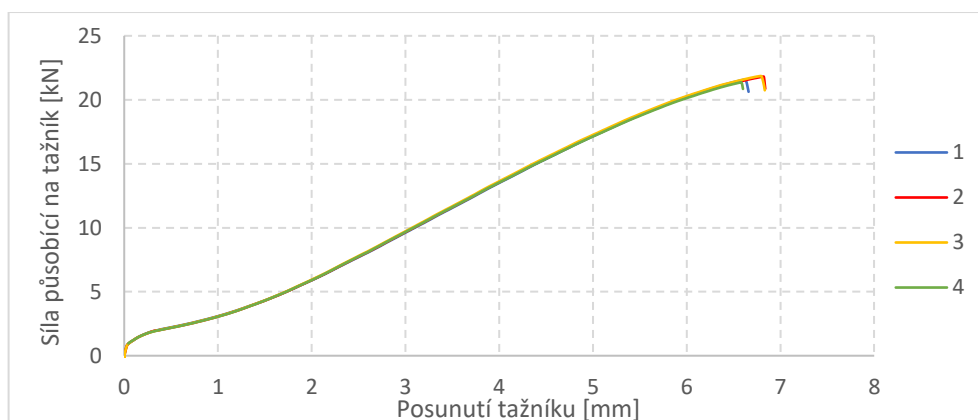
Zkouška dle Erichsena byla použita především jak porovnávací, aby bylo zjištěno, zda je zvolený materiál vhodný pro hluboké tažení. Za vhodný plech pro hluboké tažení se považuje takový, na kterém se prasklina objeví po obvodu taženého průměru nikoliv na čele.

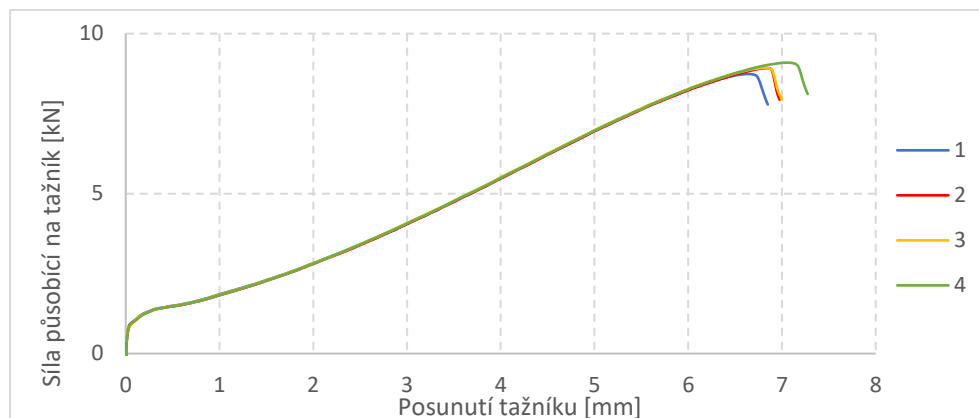
13.1.1 Výsledky zkoušky dle Erichsena

Maximální tažná síla byla nastavena na hodnotu 200 kN, tak aby došlo k porušení zkušebního tělesa. Síla působící na přidržovači byla nastavena na relativně vysokou hodnotu 30kN, aby nedocházelo k vtahování materiálu nebo zvlnění. Zvolil jsem nízkou rychlost tažení 0,5 mm/s, kvůli přesnějšímu zaznamenávání výsledků. Zkouška byla provedena pro všechny materiály stejným způsobem za stejných podmínek.

Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Erichsena

Číslo vzorku	Materiál		Materiál		Materiál	
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
1	20,37	6,67	20,68	6,96	7,72	6,86
2	20,46	6,84	20,98	7,08	7,90	6,98
3	20,74	6,83	20,57	6,86	7,91	7,01
4	20,35	6,61	20,73	7,11	8,08	7,28
Průměr	20,48	6,74	20,74	7,00	7,90	7,03
Směrodatná odchylka	0,18	0,10	0,17	0,10	0,14	0,15

Obrázek 44 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle ErichsenaObrázek 45 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Erichsena



Obrázek 46 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Erichsena

13.1.2 Vyhodnocení zkoušky dle Erichsena

Výsledek zkoušky dle Erichsena je závěr, zda je plech vhodný pro hluboké tažení. U všech zkoumaných plechů se prasklina objevovala po obvodu tažníku, což znamená, že jsou vhodné pro hluboké tažení.



Obrázek 47 – Výsledek zkoušky dle Erichsena

13.2 Zkouška dle Nakajimi

Zkouška dle Nakajimi byla využita pro zkoumání vlastností jednotlivých materiálů a vhodných procesních podmínek pro jejich zpracování. Těmito procesními podmínkami jsou síla působící na přidržovači, rychlost tažení a vliv maziva na proces tažení.

13.2.1 Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdě drážky s variací síly působící na přidržovači

Při technologii hlubokého tažení je kritické zvolit „ideální“ velikost síly na přidržovači, kvůli co nejefektivnějšímu průběhu tažení. Ideální síla na přidržovači je však jiná pro každý materiál a typ výrobku. Proto je potřeba zjistit spíše vhodné rozmezí síly pro každý materiál, tak aby byl výrobek co nejvyšší s co nejnižší zmetkovitostí, a přitom byl proces výroby co nejefektivnější. Pro testy byla zvolena síla na přidržovači pro materiál HCT980X a HCT980XG na 3 kN, 5 kN, 7 kN a 10 kN. Pro materiál HC420LA byla zvolena vyšší síla na přidržovači kvůli lepší tvárnosti (materiál měl tendenci k vtahování tažníkem) na 5 kN, 10 kN, 20 kN a 40 kN. Hodnoty sil na přidržovači byly stanoveny na základě testování materiálů, přičemž klíčovým výsledkem bylo určení mezních hodnot, v jejichž rámci má síla přidržovače významný vliv na chování materiálu. Rychlost tažení při testování byla 5 mm/s a vzorek byl mazán z obou stran kvůli co nejmenšímu opotřebení nástroje.

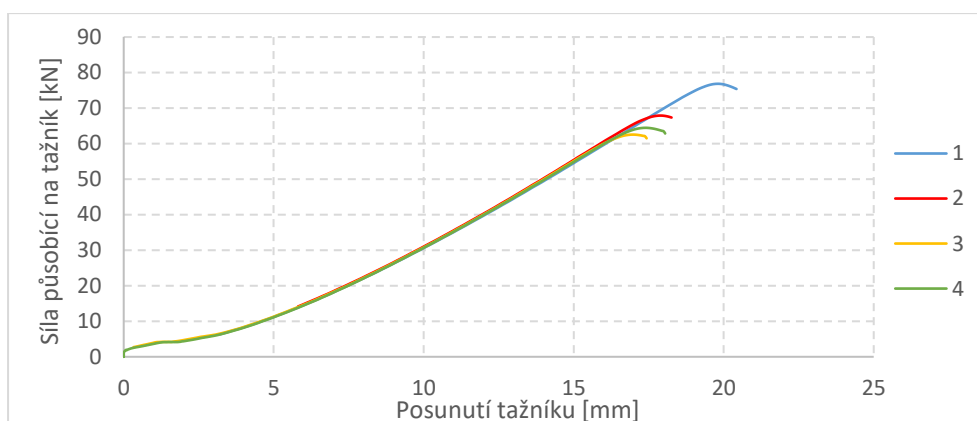
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdě drážky se silou působící na přidržovači 3 kN / 3 kN / 5 kN:

Tabulka 10 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 3 kN / 3 kN / 5 kN

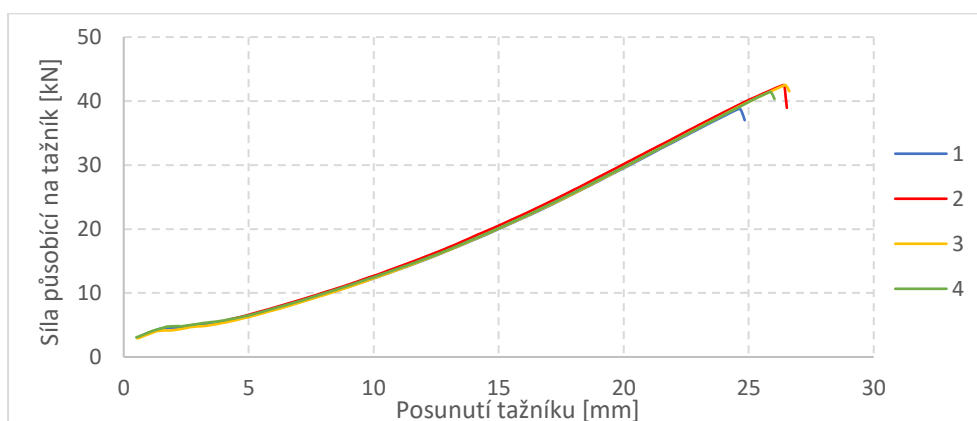
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]
1	67,68	17,75	76,24	20,16	38,14	24,74
2	65,23	17,45	67,30	18,26	40,76	26,48
3	65,44	18,15	61,46	17,43	41,95	26,57
4	59,28	16,53	63,81	17,84	40,80	25,98
Průměr	64,41	17,47	67,20	18,42	40,41	25,94
Směrodatná odchylka	3,59	0,60	6,49	1,05	1,61	0,73



Obrázek 48 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (3 kN)



Obrázek 49 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (3 kN)

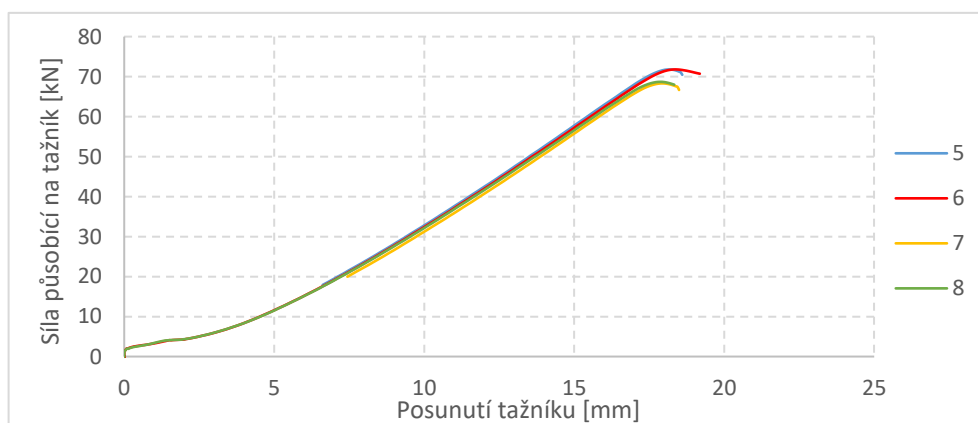


Obrázek 50 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (5 kN)

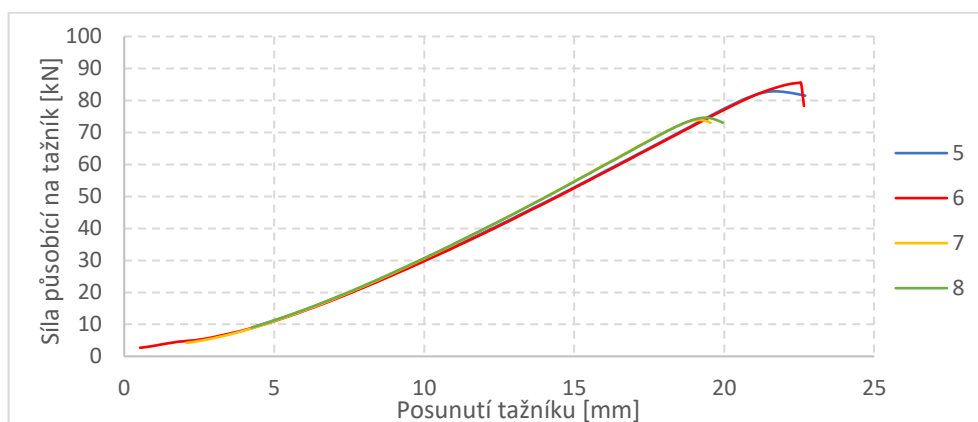
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky se silou působící na přidržovači 5 kN / 5 kN / 10 kN:

Tabulka 11 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 5 kN / 5 kN / 10 kN

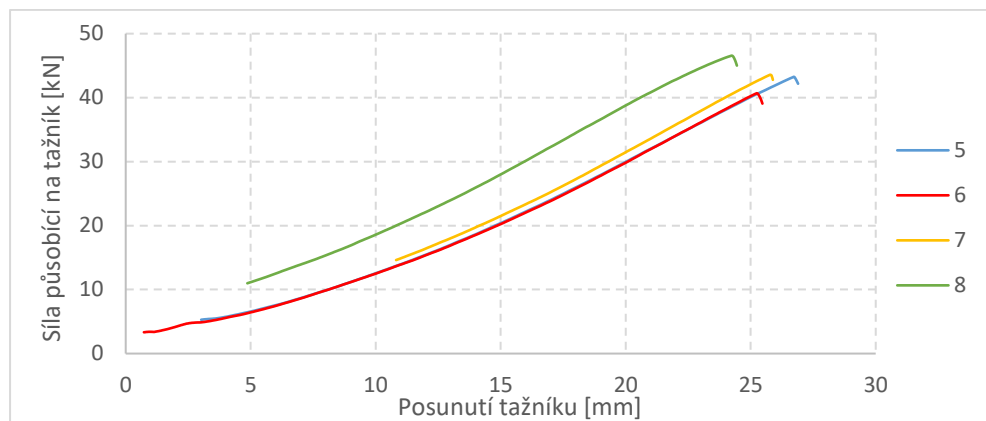
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
5	71,24	18,50	82,32	22,25	42,60	26,84
6	71,25	18,89	82,21	22,61	40,11	25,36
7	67,72	18,34	73,24	19,50	42,78	25,89
8	68,11	18,28	74,06	19,69	45,63	24,40
Průměr	69,58	18,50	77,96	21,01	42,78	25,62
Směrodatná odchylka	1,93	0,24	4,99	1,42	2,26	0,88



Obrázek 51 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (5 kN)



Obrázek 52 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (5 kN)

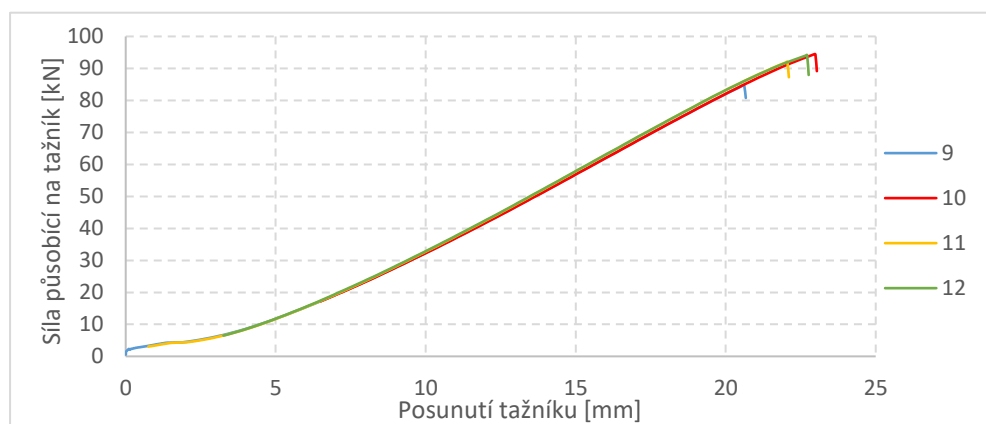


Obrázek 53 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 kN)

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky se silou působící na přidržovači 7 kN / 7 kN / 20 kN:

Tabulka 12 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 7 kN / 7 kN / 20 kN

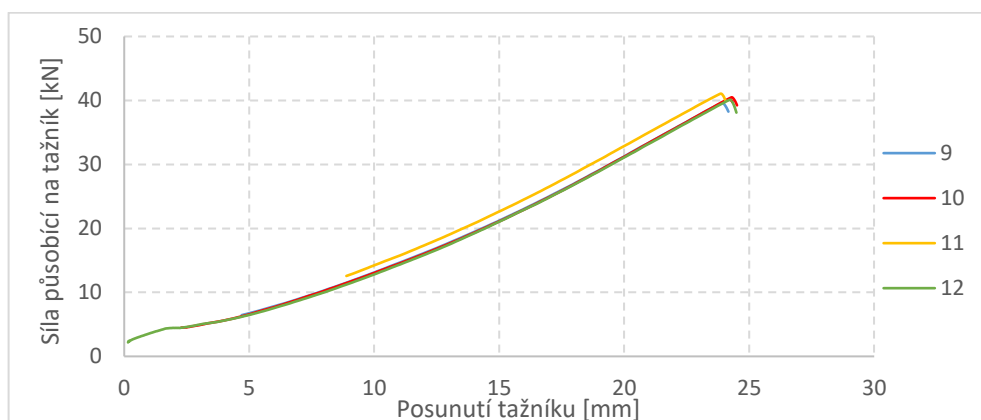
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
9	80,78	20,67	85,59	18,68	39,05	24,07
10	89,17	23,04	91,17	19,69	39,70	24,46
11	87,25	22,11	91,11	20,37	40,51	23,99
12	87,97	22,77	93,05	20,39	39,28	24,39
Průměr	88,13	22,64	90,23	19,78	39,63	24,23
Směrodatná odchylka	0,97	0,39	3,22	0,70	0,64	0,20



Obrázek 54 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (7 kN)



Obrázek 55 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (7 kN)

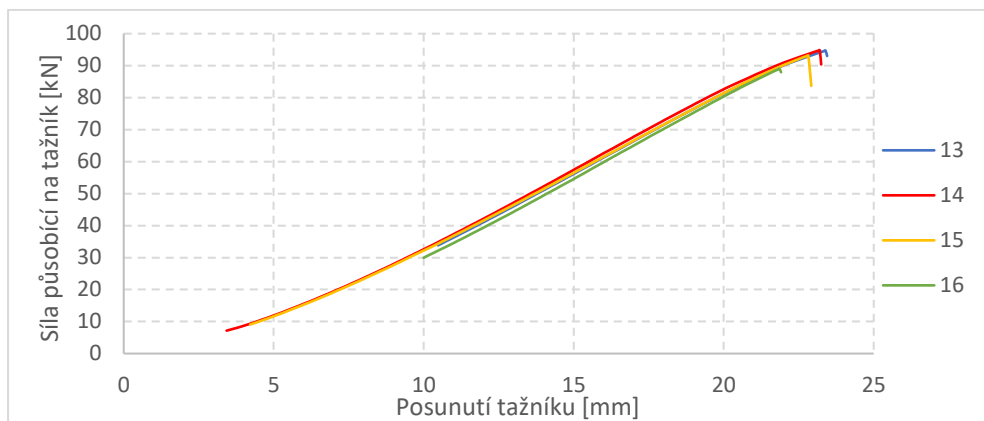


Obrázek 56 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (20 kN)

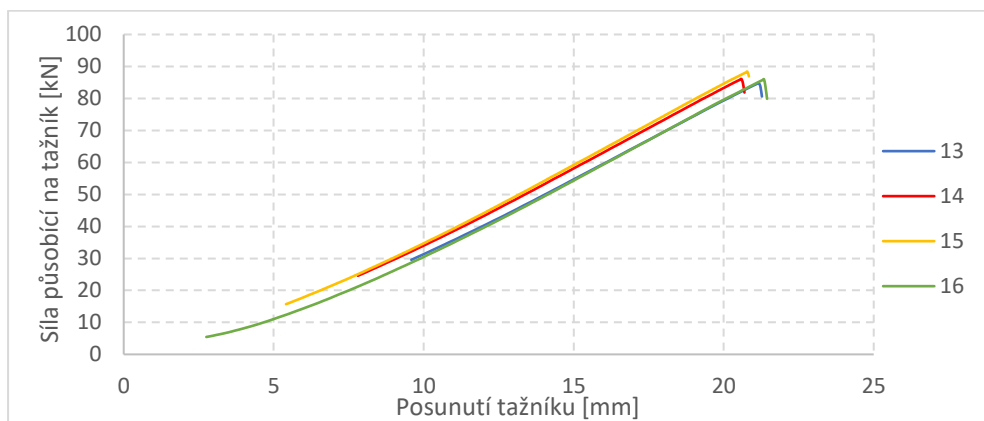
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky se silou působící na přidržovači 10 kN / 10 kN / 40 kN:

Tabulka 13 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 10 kN / 10 kN / 40 kN

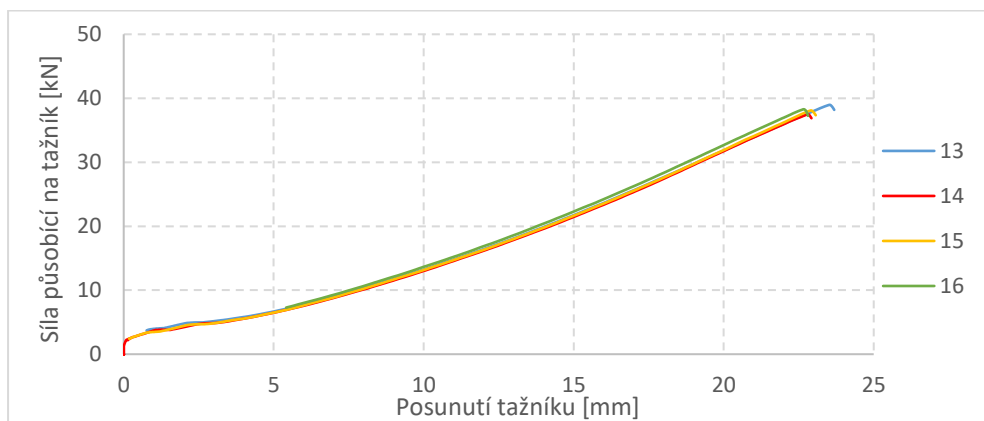
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
13	93,03	23,45	83,67	21,22	38,18	23,68
14	90,36	23,25	84,75	20,64	36,88	22,92
15	88,79	22,87	86,90	20,84	37,35	23,07
16	87,94	21,91	83,47	21,40	37,26	22,81
Průměr	90,03	22,87	84,70	21,03	37,42	23,12
Směrodatná odchylka	2,24	0,59	1,57	0,30	0,55	0,34



Obrázek 57 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 kN)



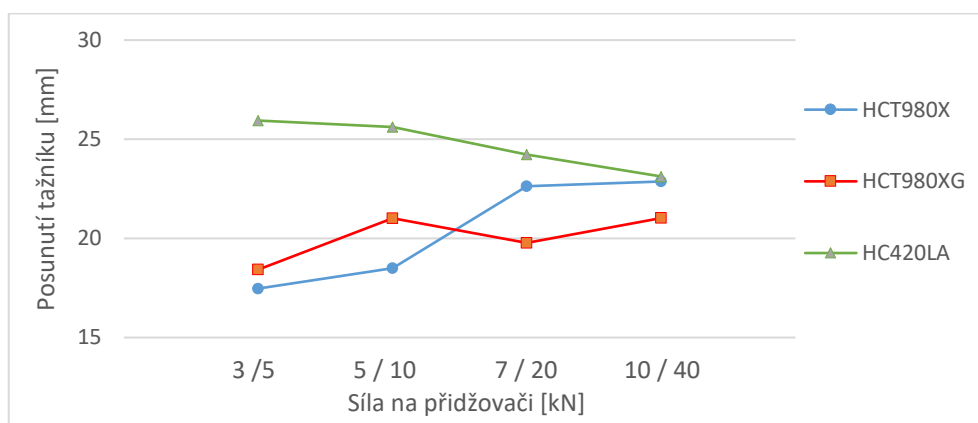
Obrázek 58 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 kN)



Obrázek 59 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (40 kN)

13.2.2 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací síly působící na přidržovači

Cílem při testování variace různých sil působících na přidržovači bylo zjistit nejvhodnější velikost síly pro jednotlivé materiály. Síla na přidržovači by měla být dost vysoká na to, aby výrobek nebyl při tažení vtahován tažníkem a nevznikalo zvlnění materiálu. Při tažení by rovněž neměli vznikat praskliny na okraji výtažku, které by mohli být způsobeny příliš vysokou silou na přidržovači.



Obrázek 60 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty síly působící na přidržovači bez brzdné drážky

Pro materiál HCT980X a HCT980XG bylo nejvhodnější využít vyšší hodnoty ze zvolených intervalů. Při hodnotě 10 kN se na výrobcích nevytvářeli defekty jako jsou vtahování, vlnění nebo poškození povrchu materiálu a zároveň byl materiál vytažen na nejvyšší zaznamenané hodnoty v rámci tohoto testu. U materiálu HCT980X byla při 10 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 22,87 mm, což je 30,9% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování síly na přidržovači. U materiálu HCT980XG byla při 10 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 21,03 mm, což je 14,1% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování síly na přidržovači. Pro materiál HC420LA je nutné vybírat vyšší hodnoty z intervalu. Důvodem této volby je vtahování materiál při nižších silách na přidržovači. U materiálu HC420LA byla při 40 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 23,12 mm, což je 10,9% pokles výšky výtažku oproti nejvyšší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování síly na přidržovači ale materiál není vtahován a je bez zvlnění.



Obrázek 61 – Zvlnění materiálu při příliš nízké síle na přidržovači při testování materiálu HC420LA (1 kN nalevo, 3 kN uprostřed, 5 kN napravo)

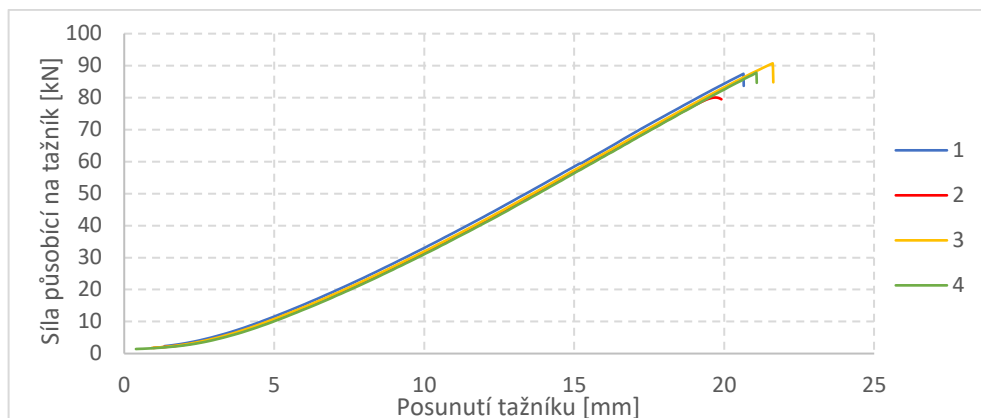
13.2.3 Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdné drážky s variací rychlosti tažení

Rychlost tažení představuje klíčový parametr v procesu hlubokého tažení. Příliš nízké rychlosti vedou k neefektivní výrobě, zatímco příliš vysoké mohou způsobovat porušení materiálu v kritických oblastech výrobku. Pro účely tohoto testování byly zvoleny rychlosti 1 mm/s, 5 mm/s a 10 mm/s, a to tak, aby bylo možné posoudit chování materiálu jak při nízkých, tak i vysokých rychlostech tažení, a zároveň vyhodnotit jejich dopad na průběh celého procesu tažení. Síla na přidržovači při testování byla 7 kN pro HCT980X a HCT980XG, 20 kN pro HC420LA a vzorek byl mazán z obou stran kvůli co nejmenšímu opotřebení nástroje. Hodnoty pro 5 mm/s jsou v Tabulce 12 a na Obrázcích 54, 55 a 56.

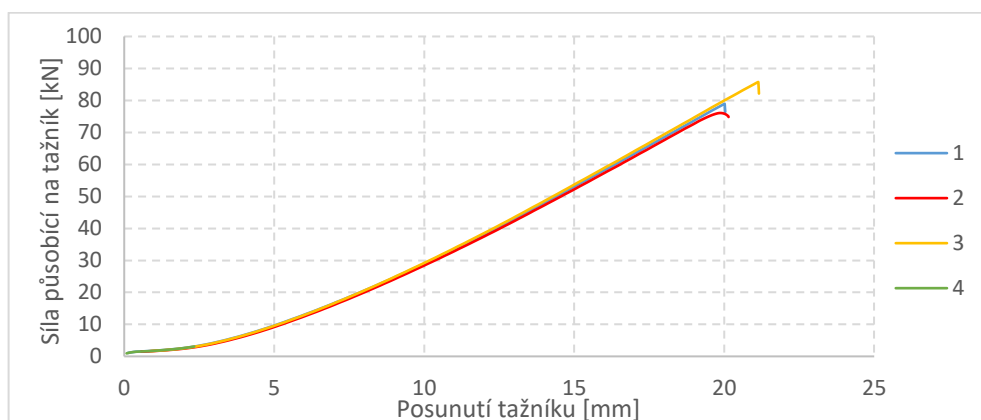
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky s rychlostí tažení 1 mm/s:

Tabulka 14 – Hodnoty pro rychlost tažení 1 mm/s

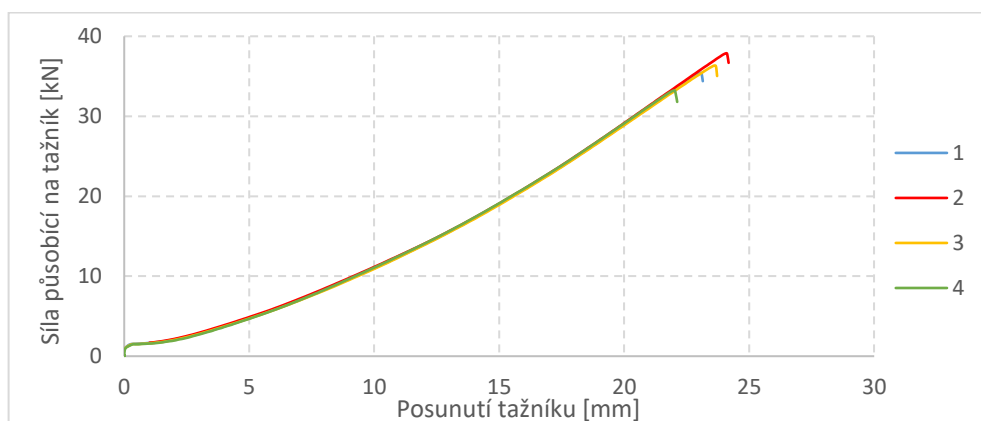
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
1	83,68	20,65	77,78	20,02	34,85	23,12
2	79,48	19,91	75,54	20,07	37,17	24,15
3	89,02	21,63	84,10	21,15	35,72	23,69
4	84,62	21,08	82,10	20,73	32,56	22,08
Průměr	84,20	20,82	79,88	20,49	35,08	23,26
Směrodatná odchylka	3,92	0,63	3,92	0,47	1,93	0,78



Obrázek 62 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)



Obrázek 63 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)

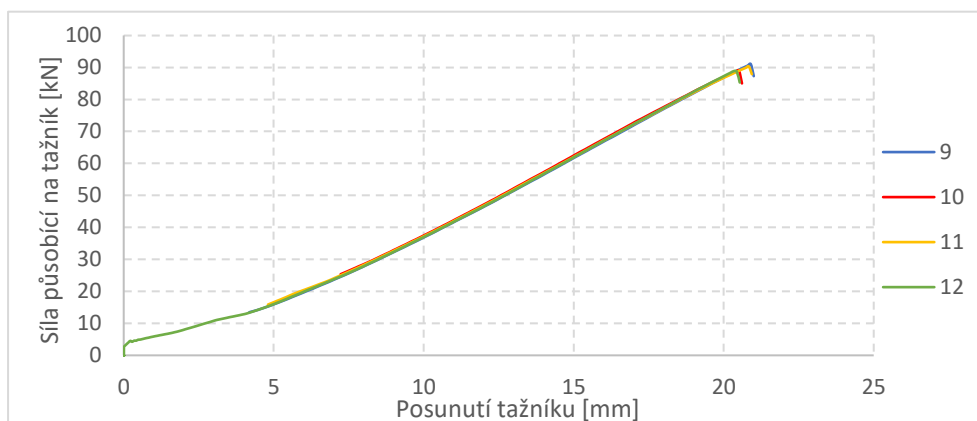


Obrázek 64 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky s rychlostí tažení 10 mm/s:

Tabulka 15 – Hodnoty pro rychlost tažení 10 mm/s

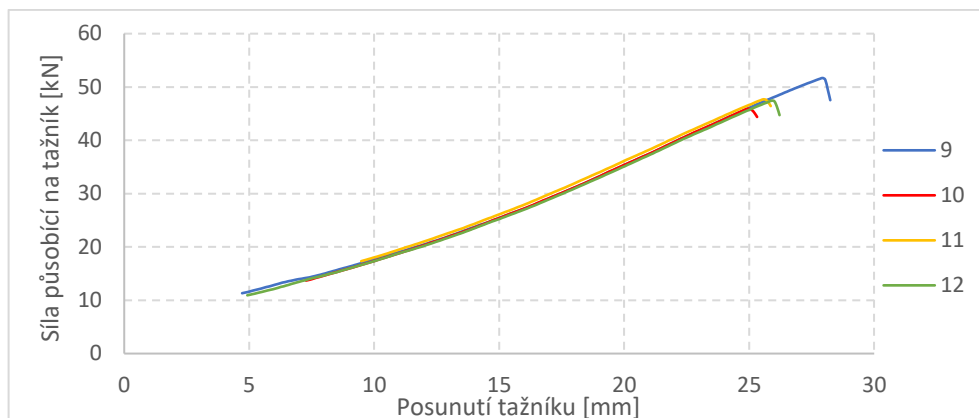
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
9	87,27	21,00	82,16	20,40	49,50	28,14
10	85,00	20,61	88,78	21,72	45,12	25,21
11	87,89	20,94	85,04	21,41	47,16	25,76
12	85,29	20,53	89,46	21,52	46,21	26,12
Průměr	86,36	20,77	86,36	21,26	47,00	26,31
Směrodatná odchylka	1,43	0,20	3,41	0,51	1,86	1,11



Obrázek 65 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (10 mm/s)



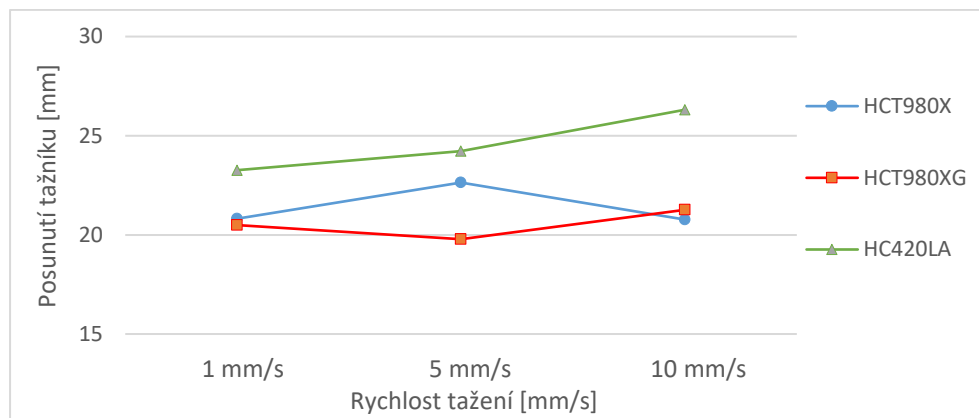
Obrázek 66 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (10 mm/s)



Obrázek 67 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 mm/s)

13.2.4 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzděné drážky s variací rychlosti tažení

Pro materiál HCT980X je ze zkoumaného intervalu nejvhodnější rychlost tažení 5 mm/s. U materiálu HCT980X byla při rychlosti tažení 5 mm/s průměrná výška výtažku 22,64 mm, což je 8,7% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování rychlosti tažení. Pro materiál HCT980XG byla rychlost 5 mm/s naopak nejméně vhodná a při rychlosti 10 mm/s byla sice dosažena nejvyššího výtažku pro tento materiál, ale zvýšení rychlosti také v určitých místech způsobovalo nadměrné ztenčení materiálu. Proto by bylo pro další zpracování vhodné pro materiál HCT980XG využít menší rychlosti zpracování jako je například 1 mm/s. U materiálu HCT980XG byla při rychlosti tažení 1 mm/s průměrná výška výtažku 20,49 mm. Materiál HC420LA je ze všech zkoumaných materiálů nejtvárnější tudíž nebyl problém jej zpracovávat při vyšších rychlostech tváření. Materiál bylo možné bez defektů zpracovávat při rychlosti tažení 10 mm/s, při této rychlosti bylo zároveň dosaženo nejvyššího výtažku. U materiálu HC420LA byla při rychlosti tažení 10 mm/s průměrná výška výtažku 26,31 mm, což je 13,1% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování rychlosti tažení.



Obrázek 68 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty rychlosti tažení bez brzdě drážky

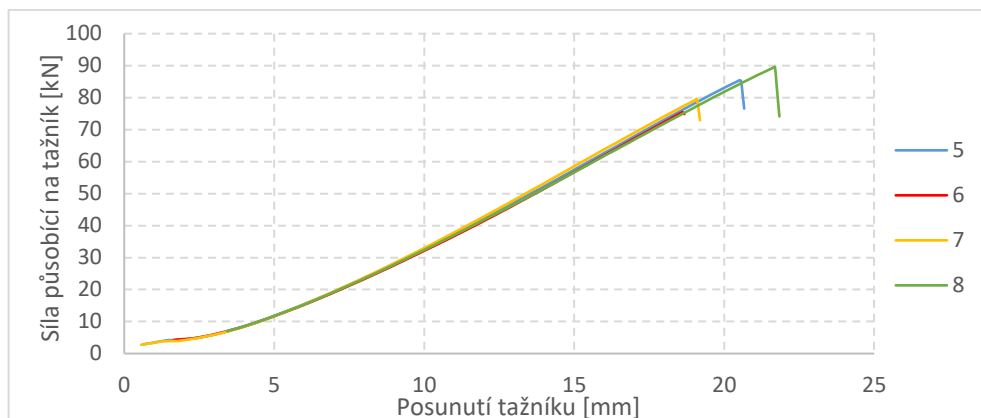
13.2.5 Výsledky zkoušky dle Nakajimi bez brzdě drážky s variací mazání

Mazivo výrazně ovlivňuje průběh procesu hlubokého tažení, což vedlo k zahrnutí různých variant mazání do materiálových zkoušek prováděných v rámci této diplomové práce. Hlavní funkcí maziva je snížení koeficientu tření mezi materiálem a funkčními částmi nástroje, čímž dochází nejen ke zlepšení plynulosti tažení, ale i k prodloužení životnosti nástroje. Testování materiálu probíhalo ve třech variantách: s mazáním na obou stranách, pouze na straně tažníku a zcela bez maziva. Síla na přidržovači při testování byla 7 kN pro HCT980X a HCT980XG, 20 kN pro HC420LA a rychlost tažení 5 mm/s. Hodnoty pro materiál mazaný na obou stranách jsou v Tabulce 12 a na Obrázcích 54, 55 a 56.

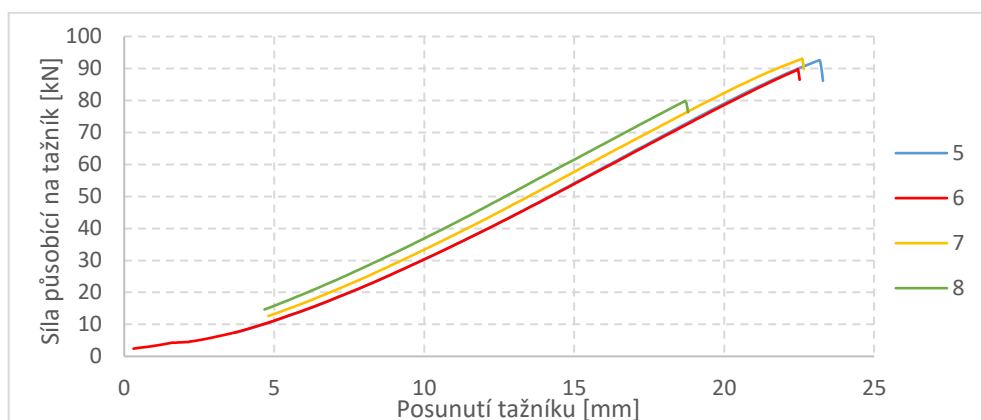
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdě drážky bez maziva:

Tabulka 16 – Hodnoty pro měření bez maziva

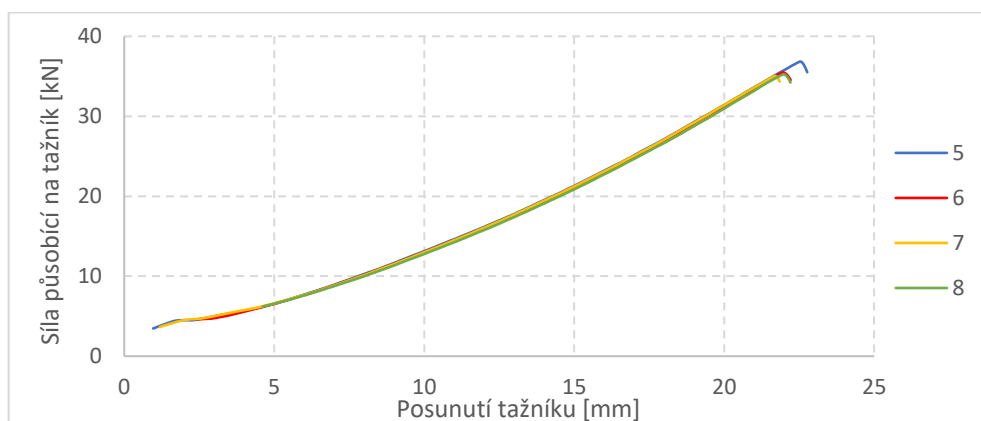
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]	F _{Break} [kN]	H _{Break} [mm]
5	81,11	20,61	90,08	23,24	35,96	22,72
6	74,85	18,67	86,46	22,51	34,85	22,16
7	76,68	19,14	89,82	22,65	34,34	21,85
8	84,57	21,74	79,02	18,74	34,59	22,16
Průměr	79,30	20,04	86,34	21,79	34,93	22,22
Směrodatná odchylka	4,39	1,22	5,15	1,78	0,72	0,31



Obrázek 69 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)



Obrázek 70 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)

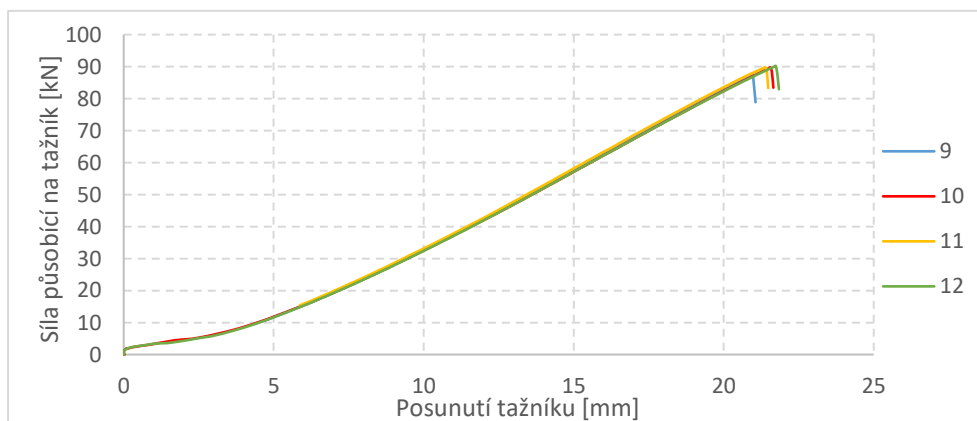


Obrázek 71 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)

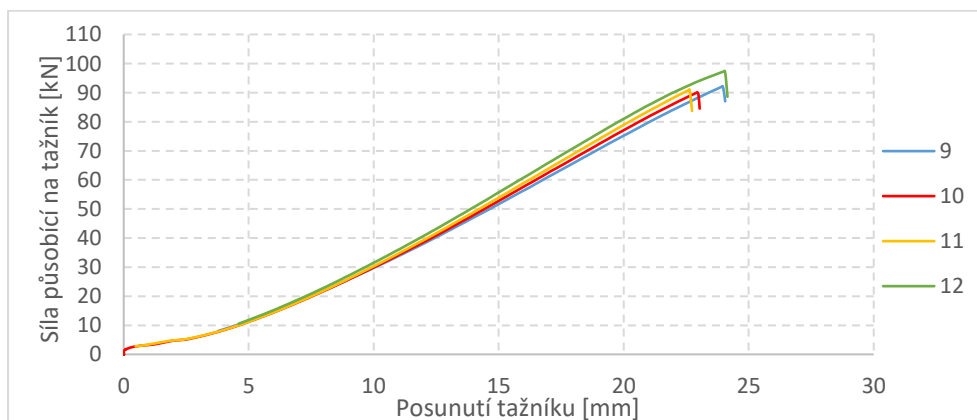
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdě drážky s mazivem pouze na straně tažníku:

Tabulka 17 – Hodnoty pro měření s mazivem pouze na straně tažníku

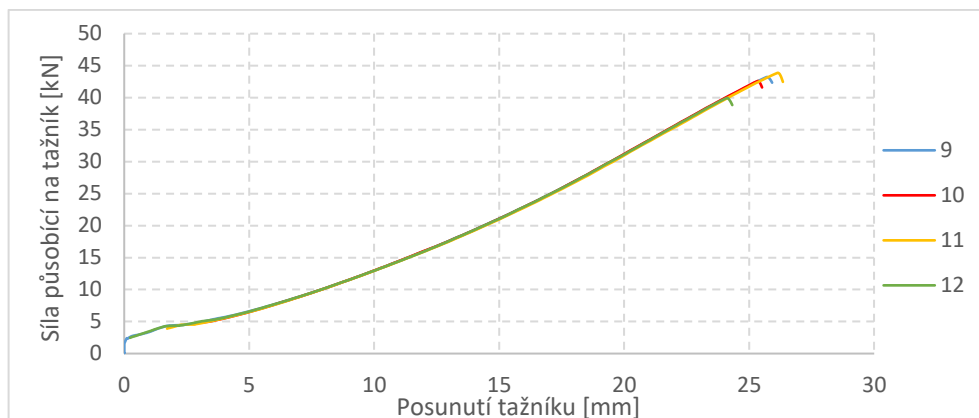
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
9	83,62	21,01	90,28	24,01	42,70	25,87
10	88,39	21,61	89,25	22,99	42,05	25,46
11	88,57	21,43	87,84	22,68	43,06	26,29
12	87,63	21,79	93,77	24,10	39,26	24,27
Průměr	87,05	21,46	90,28	23,45	41,77	25,47
Směrodatná odchylka	2,32	0,29	2,53	0,62	1,72	0,75



Obrázek 72 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdě drážky (mazivo tažník)



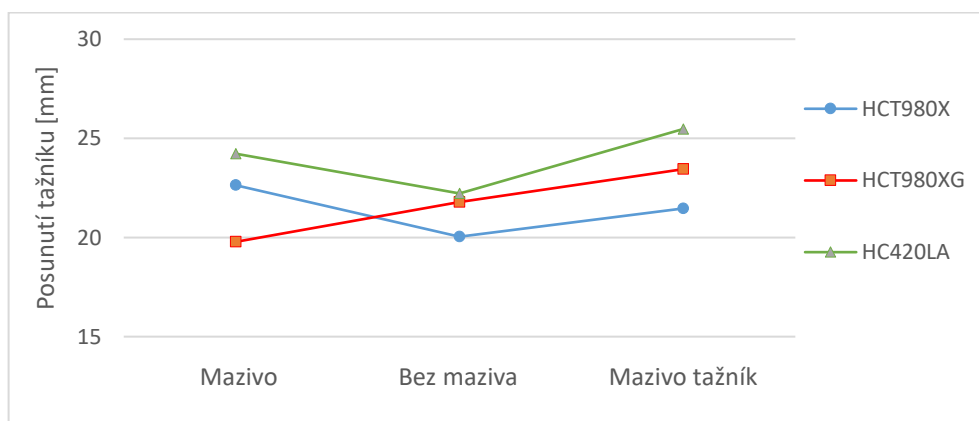
Obrázek 73 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdě drážky (mazivo tažník)



Obrázek 74 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (mazivo tažník)

13.2.6 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi bez brzděné drážky s variací mazání

Materiál HCT980X dosáhl nejvyššího výtažku při mazání obou stran polotovaru, zároveň je tato varianta mazání nejšetrnější pro nástroj, a tudíž se zvyšuje jeho životnost. U materiálu HCT980X byla při variantě s mazivem na obou stranách průměrná výška výtažku 22,64 mm, což je 8,7% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování variace mazání. Materiál HCT980XG a HC420LA dosahovali nejvyšších výtažku při mazání pouze tažníku. Tato varianta zvyšuje koeficient tření mezi polotovarem a tažnicí, která společně s přidržovačem drží materiál na místě při tažení. U materiálu HCT980XG byla při variantě s mazivem pouze na straně tažníku průměrná výška výtažku 23,45 mm, což je 18,5% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování variace mazání. U materiálu HC420LA byla při variantě s mazivem pouze na straně tažníku průměrná výška výtažku 25,47 mm, což je 13,4% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování variace mazání.



Obrázek 75 – Průměrná výška výtažku pro různé variace mazání polotovaru bez brzděné drážky

13.2.7 Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací síly působící na přidržovači

Jediný rozdíl mezi měřeními bez a s brzdou drážkou je velikost síly na přidržovači. Pro testy byla zvolena síla na přidržovači pro materiál HCT980X a HCT980XG na 100 kN, 150 kN, 175 kN a 200 kN. Pro materiál HC420LA byla zvolena nižší síla na přidržovači kvůli lepší tvárnosti (u tohoto materiálu byla zapotřebí menší síla na vytvoření brzdne drážky) na 25 kN, 50 kN, 75 kN a 100 kN. Hodnoty sil na přidržovači byly stanoveny na základě testování materiálů, přičemž klíčovým výsledkem bylo určení mezních hodnot, v jejichž rámci má síla přidržovače významný vliv na chování materiálu.

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou se silou působící na přidržovači 100 kN / 100 kN / 25 kN:

Tabulka 18 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 100 kN / 100 kN / 25 kN

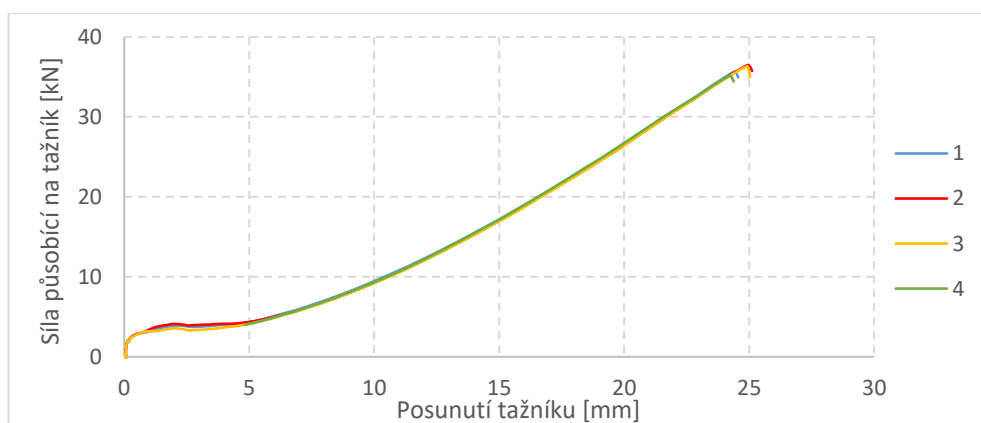
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
1	79,26	22,74	75,33	21,55	34,93	24,56
2	81,44	22,45	74,96	21,67	35,74	25,12
3	79,66	22,15	74,82	21,72	34,94	25,03
4	77,67	21,63	74,86	21,43	34,43	24,38
Průměr	79,51	22,24	74,99	21,59	35,01	24,77
Směrodatná odchylka	1,55	0,41	0,23	0,11	0,54	0,31



Obrázek 76 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (100 kN)



Obrázek 77 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (100 kN)

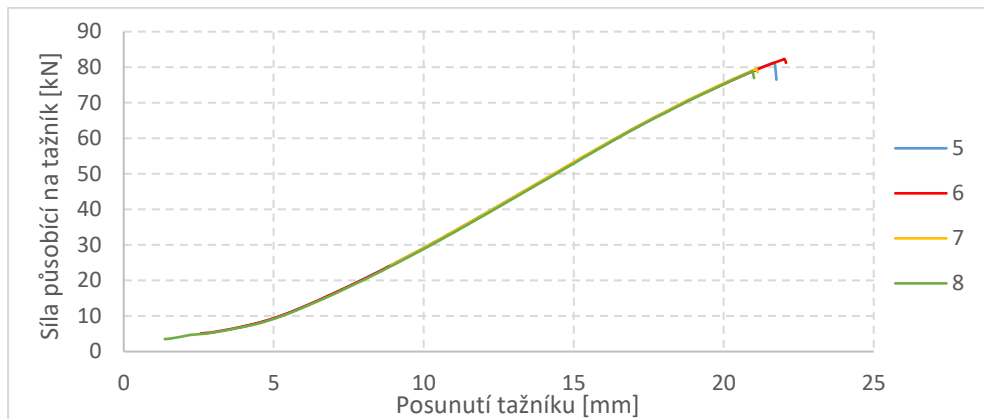


Obrázek 78 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (25 kN)

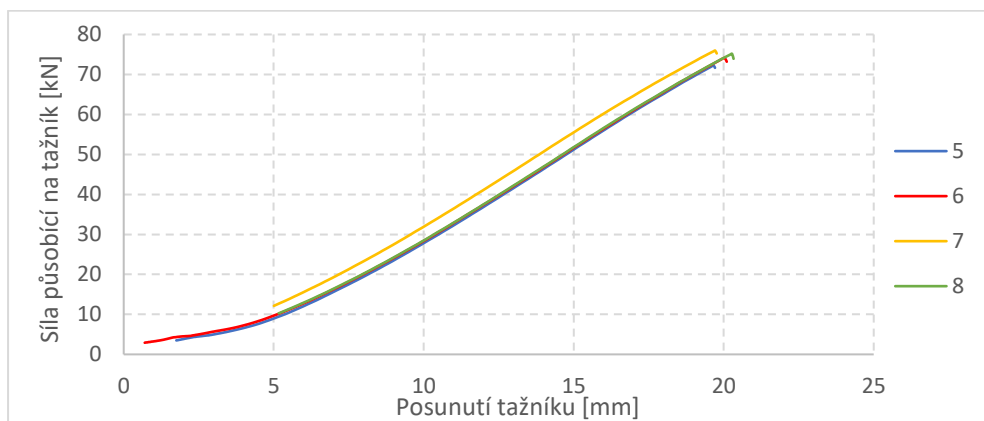
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou se silou působící na přidržovači 150 kN / 150 kN / 50 kN:

Tabulka 19 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 150 kN / 150 kN / 50 kN

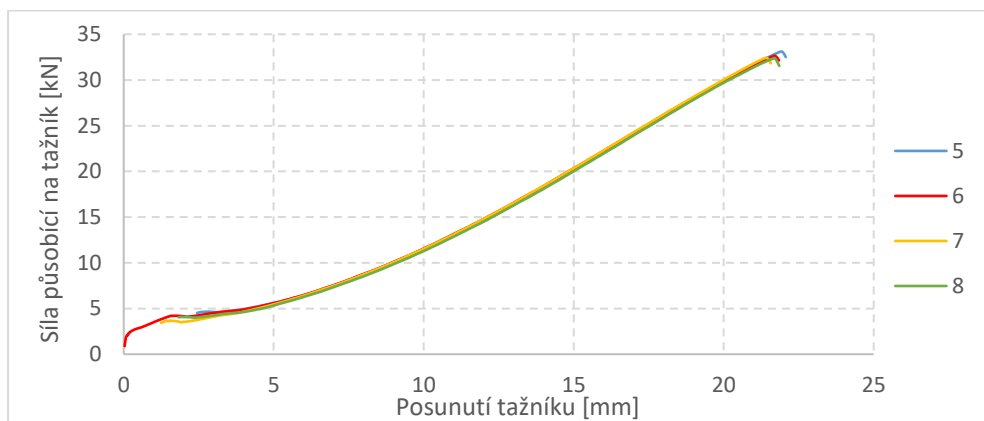
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
6	76,49	21,76	71,66	19,71	32,51	22,07
7	81,22	22,08	73,19	20,10	32,14	21,84
8	78,64	21,13	75,25	19,77	31,82	21,57
9	76,94	21,01	73,93	20,33	31,53	21,85
Průměr	78,32	21,50	73,51	19,98	32,00	21,83
Směrodatná odchylka	2,14	0,44	1,50	0,25	0,42	0,18



Obrázek 79 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (150 kN)



Obrázek 80 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (150 kN)

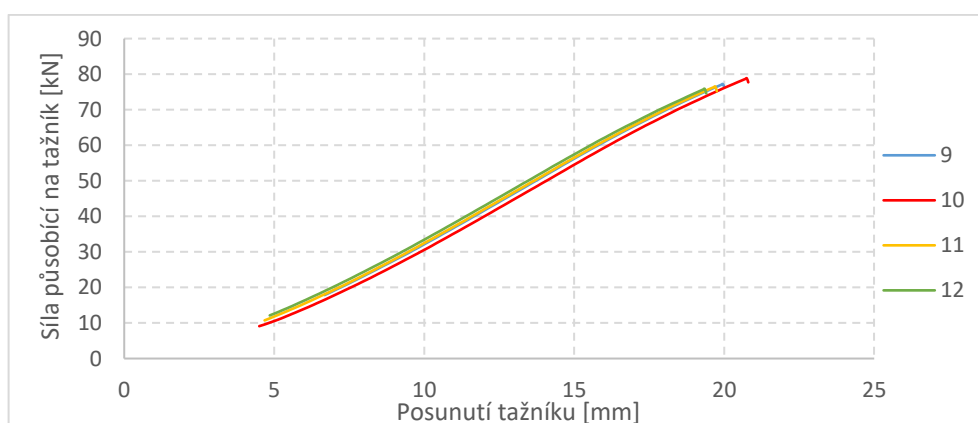


Obrázek 81 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (50 kN)

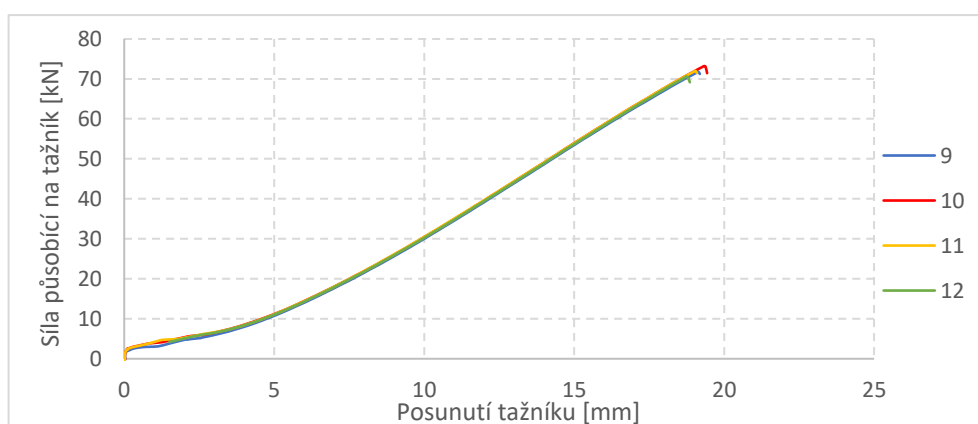
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou se silou působící na přidržovači 175 kN / 175 kN / 75 kN:

Tabulka 20 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 175 kN / 175 kN / 75 kN

Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
11	76,32	20,00	71,22	19,19	29,16	19,40
12	77,71	20,80	71,42	19,43	29,32	19,60
13	75,20	19,76	71,45	19,09	28,73	19,31
14	74,58	19,40	69,14	18,86	29,33	19,52
Průměr	75,95	19,99	70,81	19,14	29,14	19,46
Směrodatná odchylka	1,37	0,52	1,11	0,21	0,28	0,11



Obrázek 82 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (175 kN)



Obrázek 83 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (175 kN)

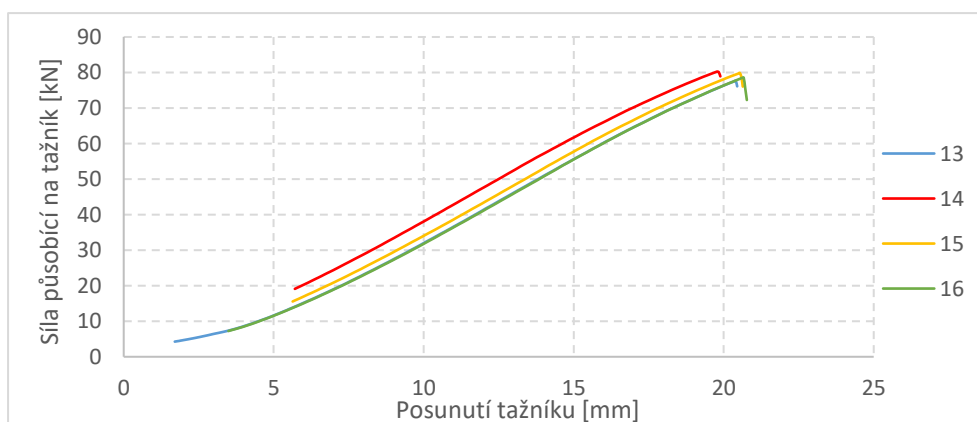


Obrázek 84 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (75 kN)

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou se silou působící na přidržovači 175 kN / 175 kN / 75 kN:

Tabulka 21 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 200 kN / 200 kN / 100 kN

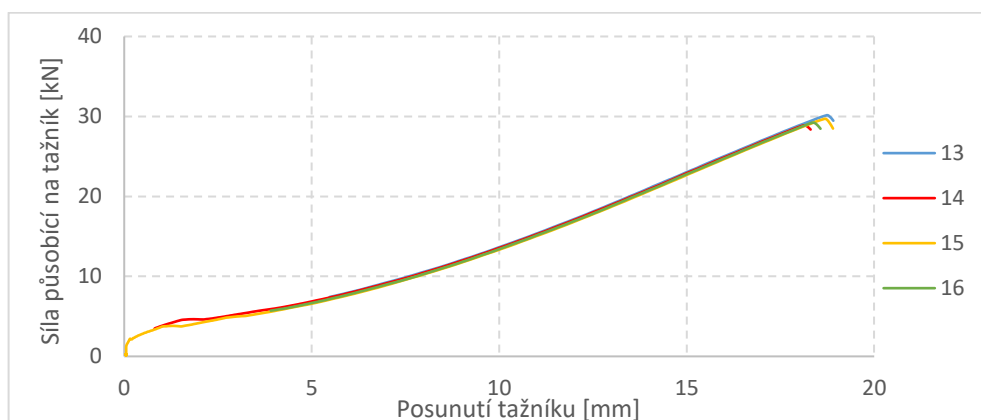
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
16	76,08	20,45	72,99	19,46	29,47	18,91
17	78,89	19,89	71,92	19,18	28,36	18,30
18	78,80	20,59	72,44	19,40	28,91	18,85
19	75,46	20,72	73,71	19,49	28,47	18,57
Průměr	77,31	20,41	72,77	19,38	28,80	18,66
Směrodatná odchylka	1,79	0,32	0,77	0,12	0,50	0,24



Obrázek 85 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (200 kN)



Obrázek 86 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (200 kN)

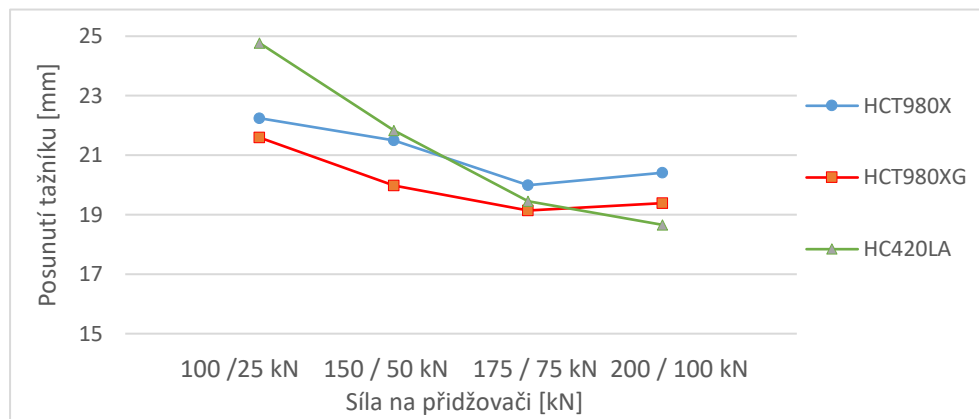


Obrázek 87 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (100 kN)

13.2.8 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací síly působící na přidržovači

Síla na přidržovači u zkoušek s brzdou drážkou byla pro materiály HCT980X a HCT980XG složitější. Pro vytvoření drážky bylo u těchto materiálů potřeba vyvinout značné zatížení na materiál. Při 100 kN se drážka vytvoří s menšími chybami, proto by bylo vhodné pro tyto materiály volit vyšší hodnoty z testovaného intervalu jako jsou 175 kN nebo 200 kN kde se brzdá drážka vytvoří bez jakýchkoliv chyb. U materiálu HCT980X byla při 200 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 20,41 mm, což je 8,2% pokles výšky výtažku oproti nejvyšší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování síly na přidržovači. U materiálu HCT980XG byla při 200 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 19,38 mm, což je 10,2% pokles výšky výtažku oproti nejvyšší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování síly na přidržovači. Materiál HC420LA je tvárnější, a proto tento problém tak značný. Pro tento materiál byla vhodná přidržovací síla 25 kN nebo 50 kN. U materiálu

HC420LA byla při 25 kN na přidržovači průměrná výška výtažku 24,77 mm (nejvyšší průměrná hodnota pro tento materiál při testování síly na přidržovači). Trend je u všech materiálů však stejný, čím menší síla na přidržovači tím vyšší výtažek.



Obrázek 88 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty síly působící na přidržovací s brzdou drážkou



Obrázek 89 – Rozdíl vytvoření drážky s nízkou hodnotou síly na přidržovači (nalevo) a vyšší hodnotou síly (napravo)

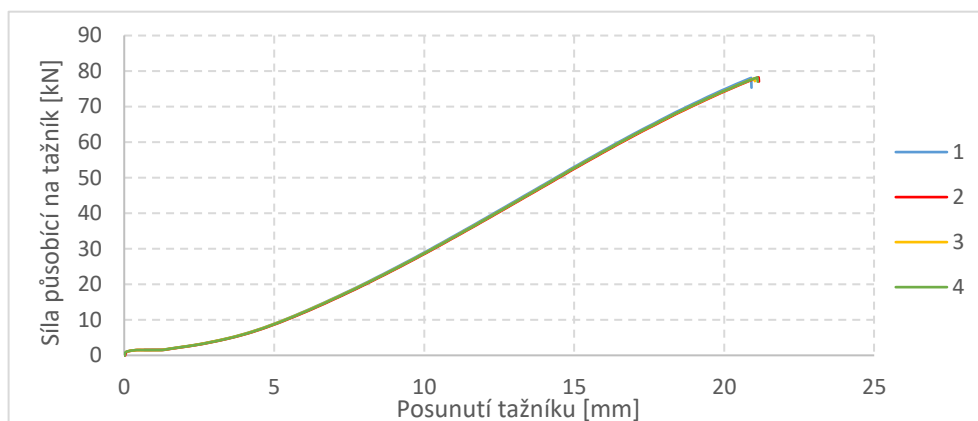
13.2.9 Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací rychlosti tažení

Pro účely tohoto testování byly zvoleny rychlosti 1 mm/s, 5 mm/s a 10 mm/s, a to tak, aby bylo možné posoudit chování materiálu jak při nízkých, tak i vysokých rychlostech tažení, a zároveň vyhodnotit jejich dopad na průběh celého procesu tažení. Síla na přidržovači při testování byla 175 kN pro HCT980X a HCT980XG, 75 kN pro HC420LA a vzorek byl mazán z obou stran kvůli co nejmenšímu opotřebení nástroje. Hodnoty pro 5 mm/s jsou v Tabulce 20 a na Obrázcích 82, 83 a 84.

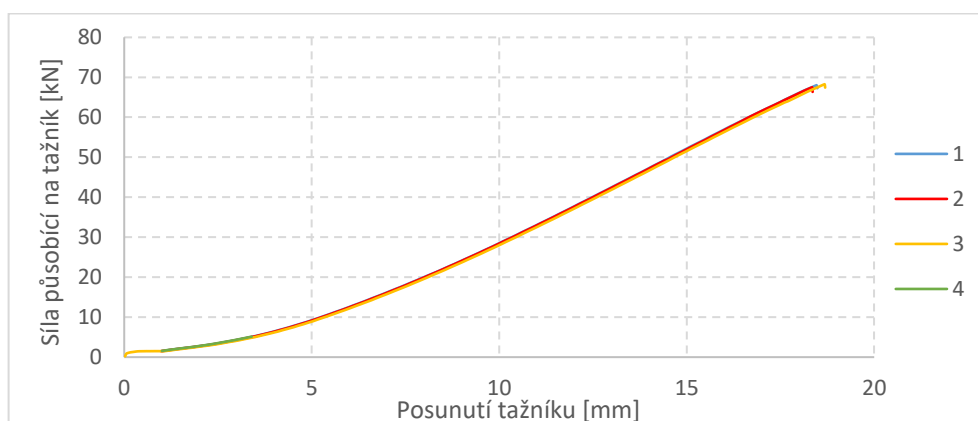
Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou s rychlostí tažení 1 mm/s:

Tabulka 22 – Hodnoty pro rychlost tažení 1 mm/s

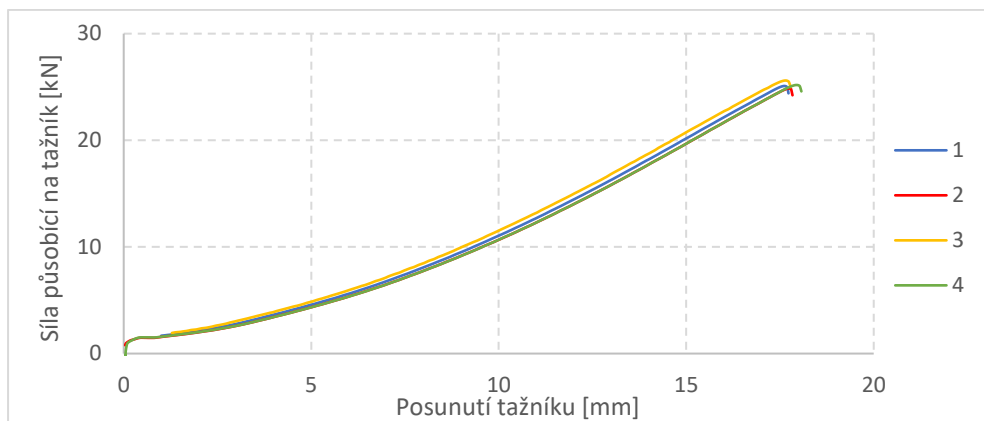
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
1	75,31	20,91	67,26	18,48	24,40	17,73
2	77,03	21,16	66,34	18,36	24,22	17,83
3	77,14	21,02	67,41	18,69	24,99	17,79
4	76,99	21,12	68,38	18,76	24,59	18,07
Průměr	76,62	21,05	67,35	18,57	24,55	17,86
Směrodatná odchylka	0,87	0,10	0,84	0,16	0,33	0,13



Obrázek 90 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)



Obrázek 91 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)

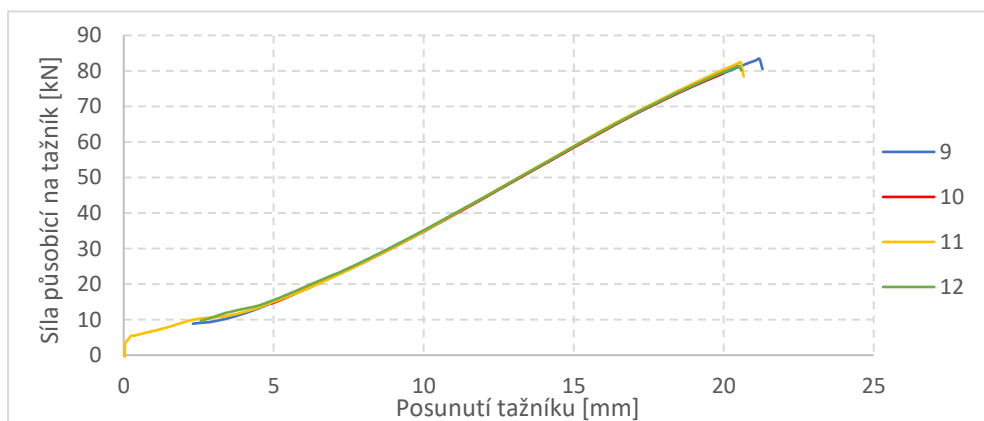


Obrázek 92 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou s rychlostí tažení 10 mm/s:

Tabulka 23 – Hodnoty pro rychlost tažení 10 mm/s

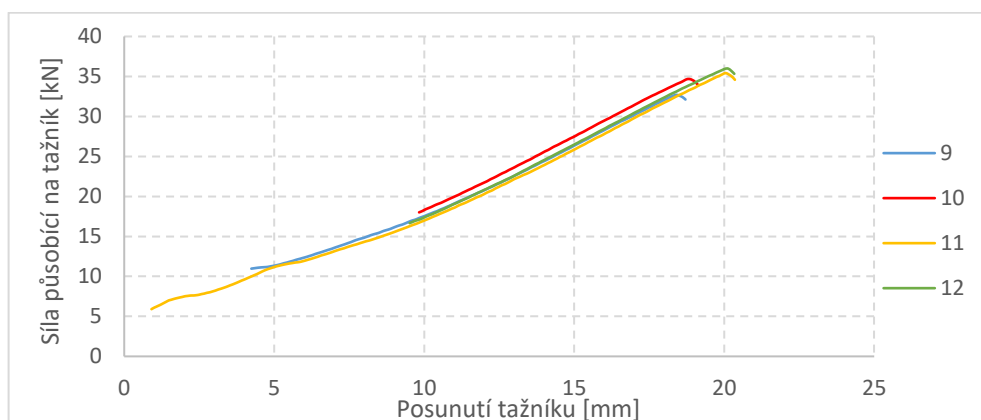
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
9	80,45	21,29	76,06	19,87	32,12	18,71
10	77,91	20,98	75,80	19,68	33,90	19,14
11	78,44	20,66	74,91	19,77	34,58	20,36
12	80,14	20,59	75,46	19,46	35,33	20,34
Průměr	79,23	20,88	75,56	19,69	33,98	19,63
Směrodatná odchylka	1,25	0,28	0,50	0,15	1,37	0,73



Obrázek 93 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)



Obrázek 94 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)

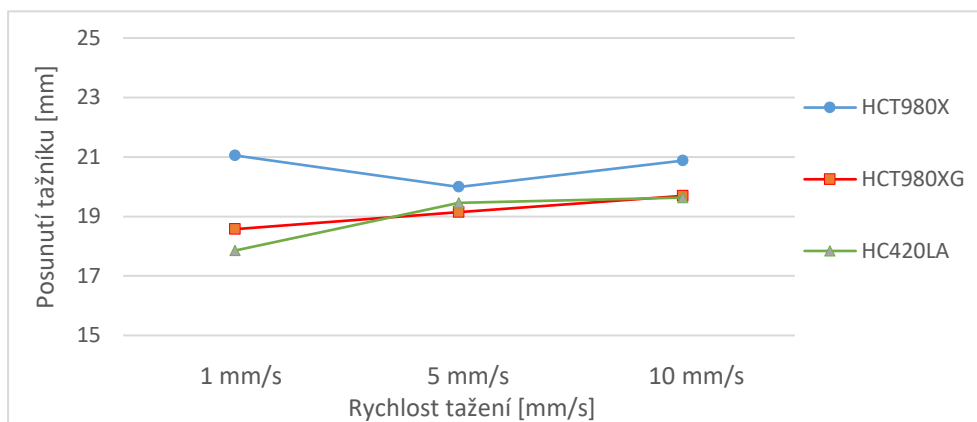


Obrázek 95 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)

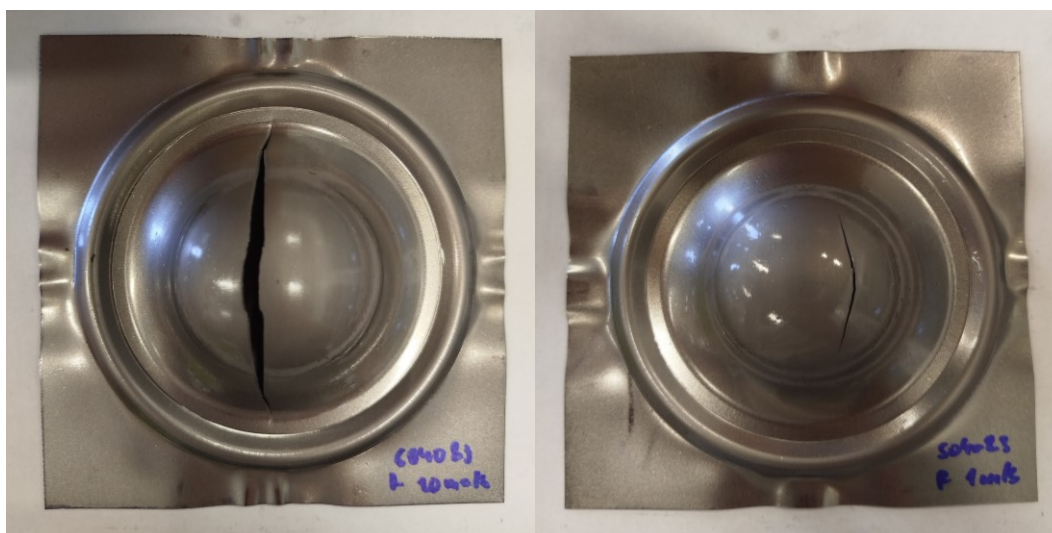
13.2.10 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací rychlosti tažení

U testů s brzdou drážkou byly rozdíly mezi výškou výtažků minimální, avšak obecně se dá říct, že nižší rychlosti vedli ke kvalitním a konsistentním výtažkům. Při vyšších rychlostech také vznikl problém u měřicího zařízení kvalitně zaznamenávat posun tažníku, a tak museli být u těchto rychlostí testy opakovány. Při rychlosti 10 mm/s je přesun materiálu rychlejší a vznikají poměrně velké praskliny na tažených tělesech. U materiálu HCT980X byla při rychlosti tažení 1 mm/s průměrná výška výtažku 21,05 mm (nejvyšší průměrná hodnota pro tento materiál při testování rychlosti tažení). U materiálu HCT980XG byla při rychlosti tažení 1 mm/s průměrná výška výtažku 18,57 mm, což je 6% pokles výšky výtažku oproti nejvyšší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování rychlosti tažení. U materiálu HC420LA byla při rychlosti tažení 10 mm/s průměrná výška výtažku 19,63 mm,

což je 10% nárůst výšky výtažku oproti nejnižší průměrné hodnotě pro tento materiál při testování rychlosti tažení.



Obrázek 96 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty rychlosti tažení s brzdou drážkou



Obrázek 97 – Rozdíl rychlosti tažení a následného vzniku prasklin na vzorku 10 mm/s (napravo) a 1 mm/s (nalevo)

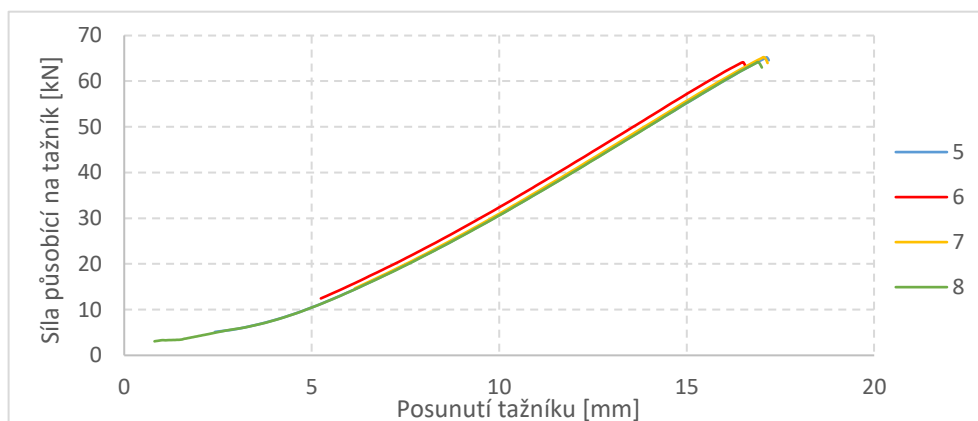
13.2.11 Výsledky zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací mazání

Testování materiálu probíhalo ve třech variantách: s mazáním na obou stranách, pouze na straně tažníku a zcela bez maziva. Síla na přidržovači při testování byla 175 kN pro HCT980X a HCT980XG, 75 kN pro HC420LA a rychlost tažení 5 mm/s. Hodnoty pro materiál mazaný na obou stranách jsou v Tabulce 20 a na Obrázcích 82, 83 a 84.

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou bez maziva:

Tabulka 24 – Hodnoty pro měření bez maziva

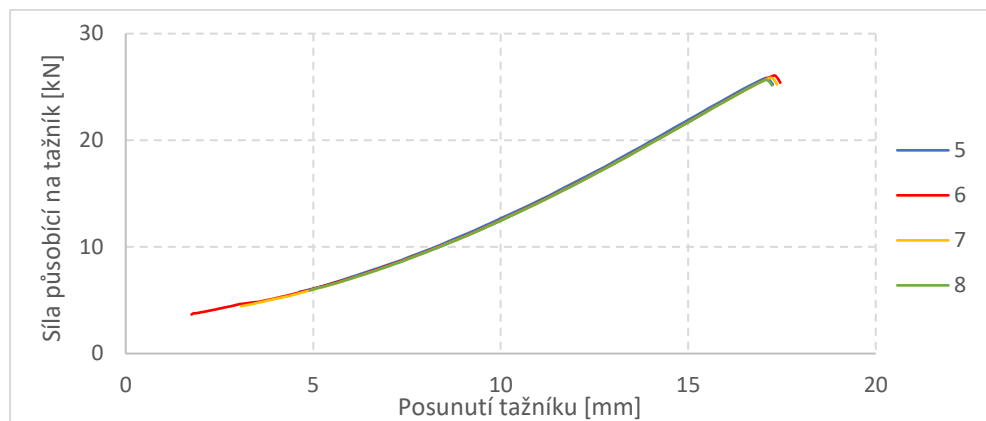
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
6	64,57	17,19	74,00	20,20	25,23	17,26
7	63,27	16,57	71,89	19,62	25,40	17,46
8	63,96	17,16	71,42	19,78	25,23	17,37
9	62,98	17,00	61,34	17,10	25,15	17,23
Průměr	63,70	16,98	69,66	19,18	25,25	17,33
Směrodatná odchylka	0,71	0,25	5,66	1,22	0,10	0,09



Obrázek 98 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)



Obrázek 99 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)

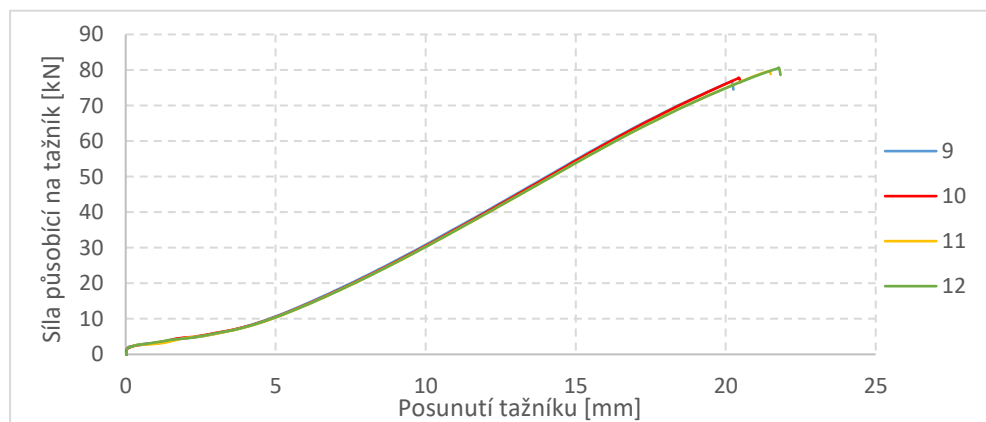


Obrázek 100 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)

Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou s mazivem pouze na straně tažníku:

Tabulka 25 – Hodnoty pro měření s mazivem pouze na straně tažníku

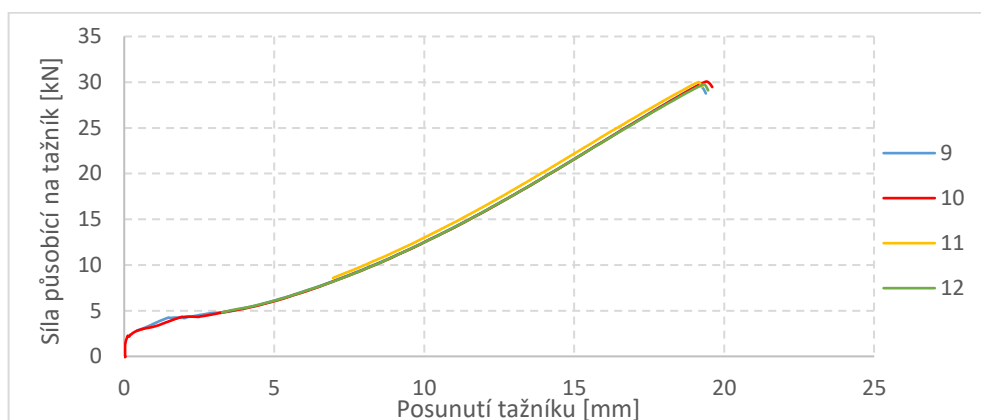
Číslo vzorku	Materiál					
	Ocel HCT980X		Ocel HCT980XG		Ocel HC420LA	
	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]	F_{Break} [kN]	H_{Break} [mm]
11	74,51	20,26	72,75	19,78	29,11	19,34
12	76,59	20,50	70,65	19,21	29,47	19,60
13	78,87	21,50	72,45	19,63	29,49	19,26
14	78,62	21,83	68,39	18,96	29,10	19,46
Průměr	77,15	21,02	71,06	19,40	29,29	19,42
Směrodatná odchylka	2,03	0,66	2,01	0,33	0,21	0,13



Obrázek 101 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník)



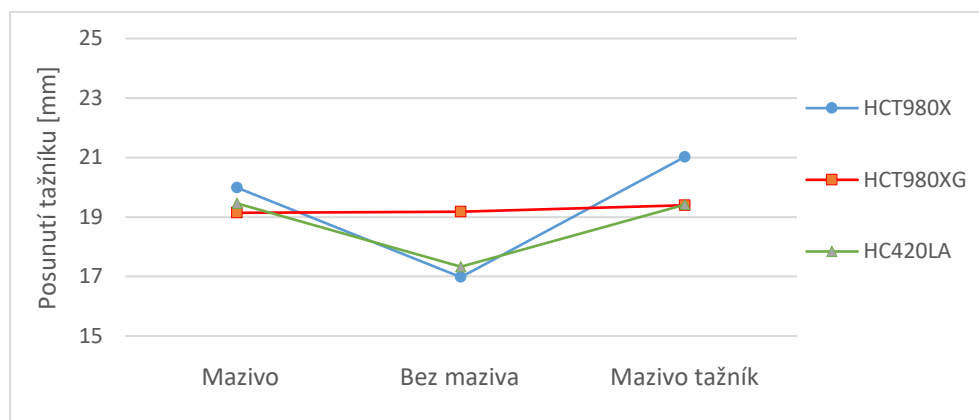
Obrázek 102 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník)



Obrázek 103 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník)

13.2.12 Vyhodnocení zkoušky dle Nakajimi s brzdou drážkou s variací mazání

Při testech s brzdou drážkou je jasné, že proces tažení bez maziva je neefektivní. Vysoké tření způsobuje snížení výšky samotných výtažků, jak je vidět u materiálů HCT980X a HC420LA. U materiálu HCT980XG je výška výtažků konsistentní. Pro reálný proces by však u všech těchto materiálů bylo využito mazivo, kvůli zvýšení životnosti tažného nástroje. U HCT980X byla při variantě s mazivem pouze na straně tažníku průměrná výška výtažku 19,99 mm (nejvyšší průměrná hodnota pro tento materiál při testování variace maziva). U HCT980XG byla při variantě s mazivem na obou stranách průměrná výška výtažku 19,14 mm. U HC420 byla při variantě s mazivem na obou stranách průměrná výška výtažku 19,46 mm (nejvyšší průměrná hodnota pro tento materiál při testování variace maziva).



Obrázek 104 – Průměrná výška výtažku pro různé variace mazání polotovaru s brzdou drážkou

14 POROVNÁNÍ EXPERIMENTU SE SIMULACÍ

Simulační softwary jsou v praxi běžně využívány pro kontrolu vyrobiteľnosti dílů nebo funkčnosti tvářecích nástrojů. V této diplomové práci bude však simulační software využit pro porovnání reálných zkušebních těles s výsledky simulace.

14.1 Volba simulačního softwaru

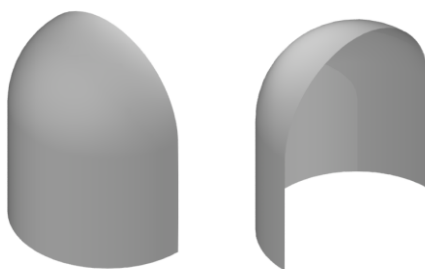
Pro vytvoření simulace do této diplomové práce je využit program AutoForm Forming R8 švýcarské firmy AutoForm. Tento software má mnoho různých funkcí pro výrobu součástí lisováním či tažením. Funkce jako jsou simulace vyrobiteľnosti, základní evaluace výsledků (FLD diagram, ztenčení materiálu při tváření, kritické zóny na výrobku atd.), kompenzace odpružení při výrobě, sigma simulace pro robustní výrobní proces, rychlá tvorba jednoduchých nástrojů a mnoho dalších. V této diplomové práci jsou využity funkce simulace vyrobiteľnosti dílů a základní evaluace výsledků tváření.

14.2 Tvorba simulace

Simulace v softwaru AutoForm je lineární a relativně intuitivní. Od importu zkoumaného výrobku, výběr materiálu pro výrobek, tvorby jednoduchého nástroje (tažník, tažnice, přidržovač), výběr tvaru a rozměru polotovaru až po tvorbu brzděné drážky, výběr maziva a samotný výpočet simulace.

14.2.1 Model tažníku

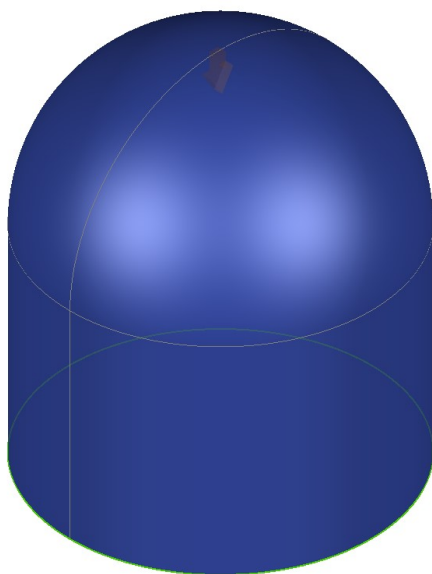
Jelikož předpokládáme, že nevíme, v jaké chvíli vznikne ve zkoumaném plechu trhlinka využíváme jako model pro importování do simulace model tažníku. Model byl vytvořen v programu Autodesk Inventor Professional 2025. Jelikož je jednodušší importování ploch je tažník reprezentován jeho vnější plochou. Tažník je také symetrický což znamená, že lze importovat pouze polovinu a zrcadlit jej v programu AutoForm což zjednoduší výpočet.



Obrázek 105 – Model tažníku z různých pohledů

14.2.2 Importování modelu

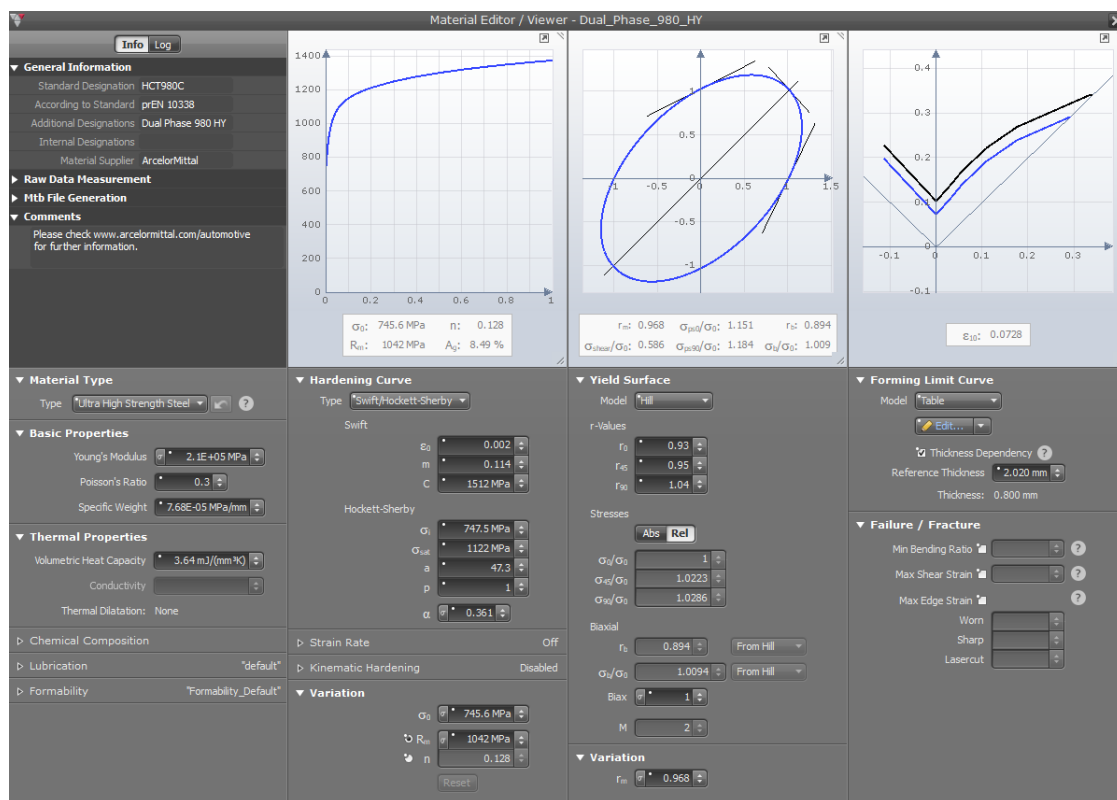
Model tažníku je, jak už bylo řečeno importován pouze jako plocha a polovina reálného tažníku. Po importování je třeba zrcadlit importovanou plochu. Pro tyto případy je v prostředí AutoForm přímo vytvořená funkce (byly využity rovina symetrie rovnoběžná se směrem tažení na obrázku je zřejmé, že je tažník složený ze dvou částí). Po zrcadlení je také třeba určit směr tažení (oranžová šipka musí mířit proti směru tažení).



Obrázek 106 – Importovaný a zrcadlený model tažníku

14.2.3 Volba materiálu pro simulaci

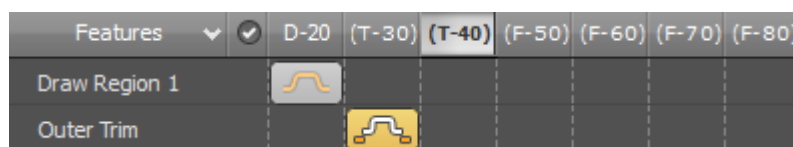
Software AutoForm disponuje knihovnou materiálů přímo od výrobce. Materiály jsou děleny dle norem nebo jsou děleny dle hutního výrobce. Je možné také požádat dodavatele, zda má materiál svůj vlastní model do programu AutoForm. Knihovna AutoForm obsahovala materiál DualPhase 980 (stejný typ oceli jakou využíváme pro testování), a tudíž byl zvolen právě tento materiál pro simulaci. V tomto modelu lze najít křivku zpevnění, mezní plochu nebo FLC diagram a také řadu mechanických vlastností tohoto materiálu. Také je zde vidět podle označení typu oceli, že se jedná o vysokopevnostní ocel. Při výběru materiálu je také potřeba určit tloušťku plechu. Jelikož se snažíme o přímou kopii reálných testů, byla tloušťka zvolena 0,8 mm (jedná se o stejnou tloušťku, kterou měli testovací tělesa).



Obrázek 107 – Materiálový model DualPhase 980 z AutoForm

14.2.4 Výběr virtuálního stroje a plánu operací

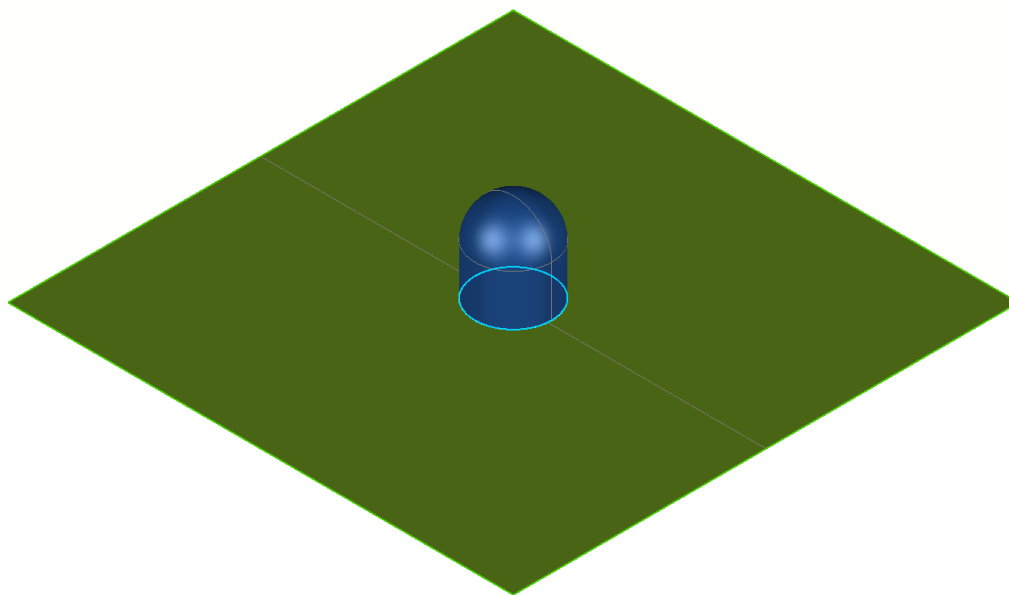
Pro tuto simulaci byl vybrán hydraulický lis PressLine 1300T z knihovny AutoForm. Tento lis splňuje všechny požadavky pro simulaci procesu tažení, který je pro tuto aplikaci potřeba. Plán operací je pro tuto jednoduchý a potřebujeme pouze krok D-20 (krok tažení), kroky T-30 až T-70 „přeskočíme“ (označeno závorkami u každého kroku), protože nevyužíváme ostřížení, prostřihy a další operace zahrnuté v těchto krocích.



Obrázek 108 – Plán operací simulace

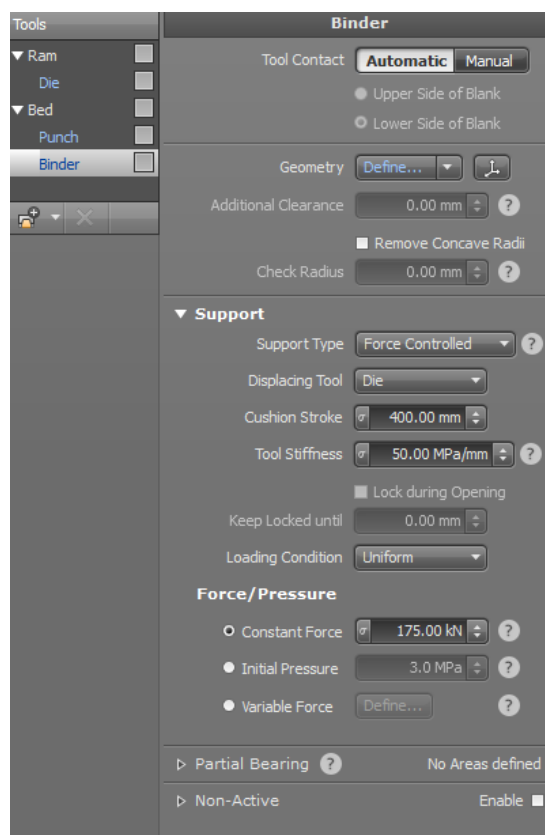
14.2.5 Nastavení přidržovače

Jelikož je přidržovač u reálného testovacího zařízení vodorovná plocha s vyfrézovanou drážkou je modelován přidržovač v simulaci co nejpodobnější realitě. AutoForm nabízí možnost automatického generování jednodušších přidržovačů. Tato funkce byla při tvorbě simulace využita.



Obrázek 109 – Plochý přidržovač pro simulaci tažení

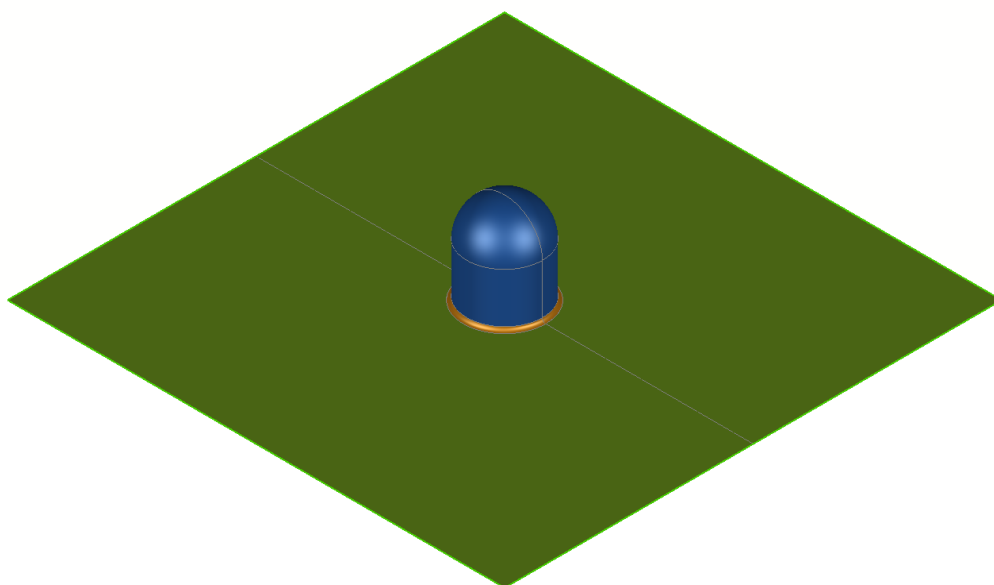
V nastavení přidržovače byla vybrána možnost působení konstantní síly na přidržovači a nastavena hodnota 175 kN stejně jako u reálných testů.



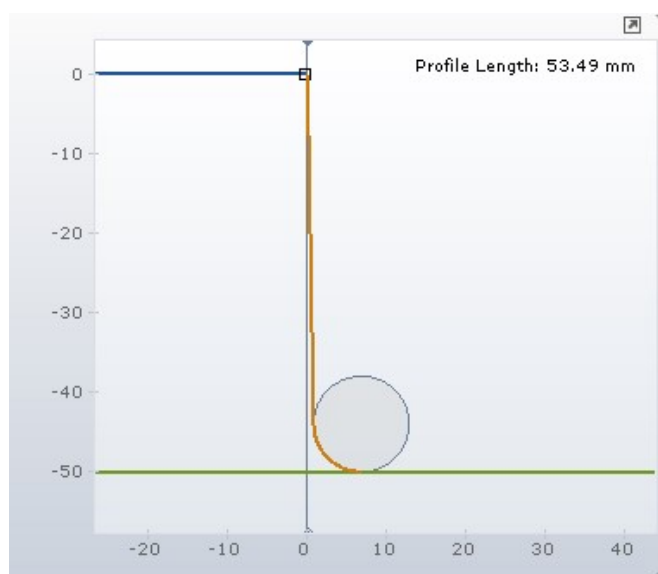
Obrázek 110 – Nastavení síly na přidržovači

14.2.6 Nastavení addenda

Addendum nebo také přídavek je další krok v sekvenci modelování nástroje. Addendum v tomto případě simuluje rádius utvořený při tažení způsobený kopírováním zaoblení hrany tažnice na zkušebním zařízení. AutoForm je opět schopný vytvářet jednoduchá addenda automaticky, v tomto případě však muselo být addendum modelováno přes dialogové okno, tak aby co nejvíce připomínalo reálné podmínky. Addendum je označenou oranžovou plochou, aby bylo lepe vidět (jedná se prakticky pouze o rádius o stejné hodnotě jako na tažnici testovacího zařízení).



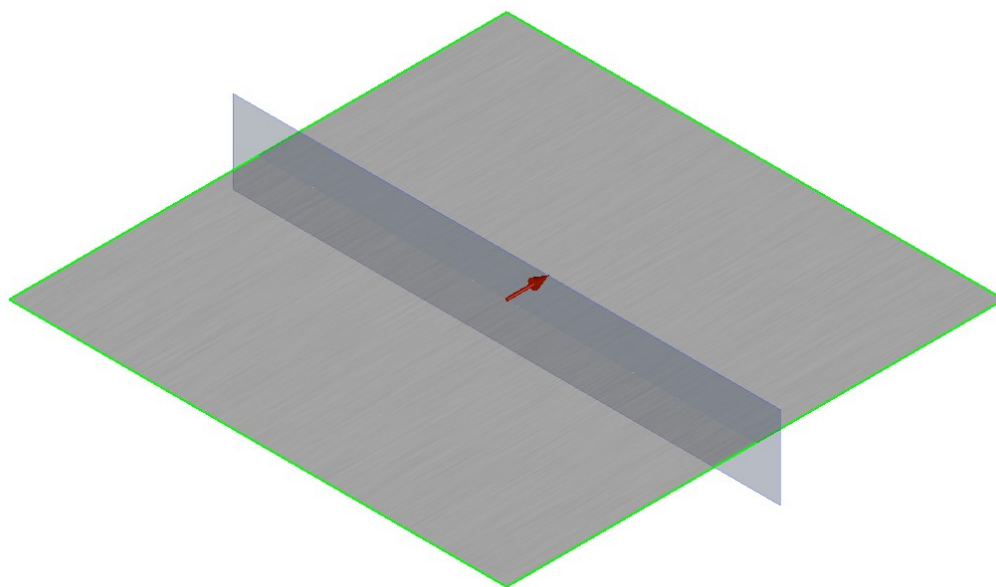
Obrázek 111 – Addendum pro tažení



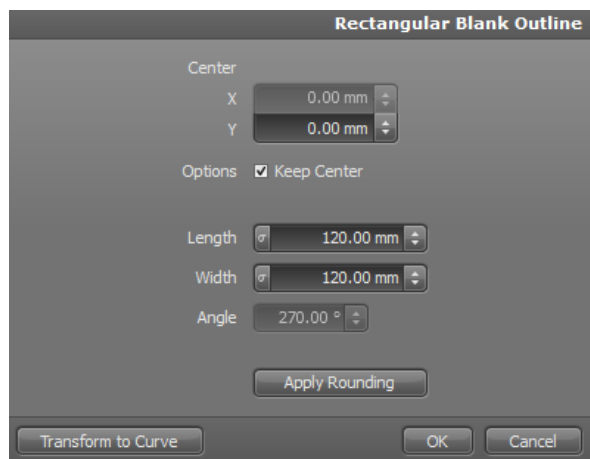
Obrázek 112 – Profil addenda v průřezu

14.2.7 Tvorba polotovaru pro simulaci

Pro tvorbu polotovaru byla využita funkce tvorby plochého polotovaru čtvercového tvaru. Jedná se o nejjednodušší tvar polotovaru a zároveň repliku reálně použitého polotovaru. Tento polotovarový čtverec má rozměry 120 x 120 mm (červená šipka pouze symbolizuje posun materiálu u tažení na více kroků, pro naše potřeby je nepodstatná).



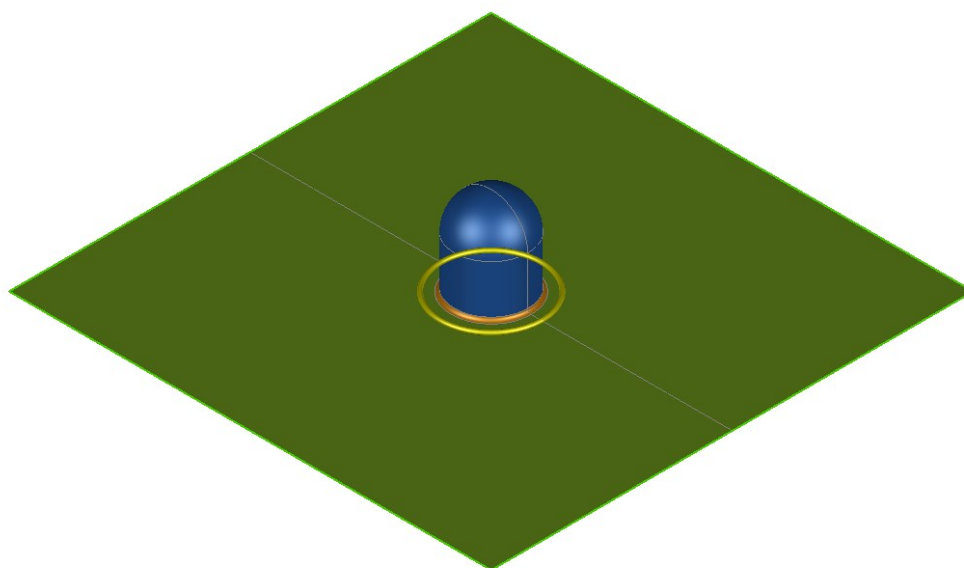
Obrázek 113 – Polotovar pro simulaci



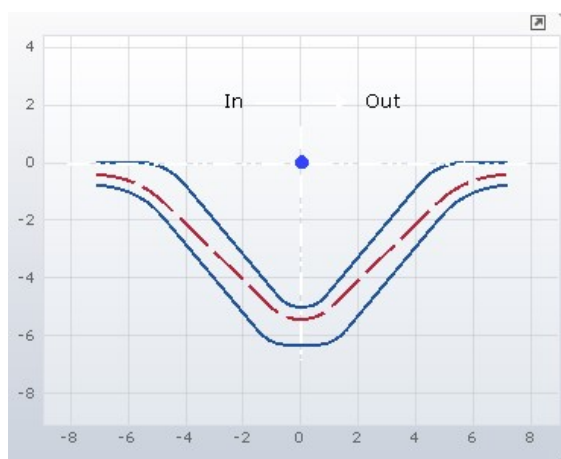
Obrázek 114 – Nastavení rozměrů polotovaru

14.2.8 Tvorba brzdne drážky

Jelikož je testovací zařízení opatřeno brzdou drážkou je třeba ji vytvořit i v simulaci. Pro simulaci je potřeba určit odsazení brzdne drážky od tažníku a její profil. V tomto případě se jedná o symetrickou drážku trojúhelníkového průřezu odsazenou o 10 mm od obvodu tažené součásti (žlutý kruh symbolizuje polohu brzdne drážky na polotovaru).



Obrázek 115 – Poloha brzdné drážky na výrobku



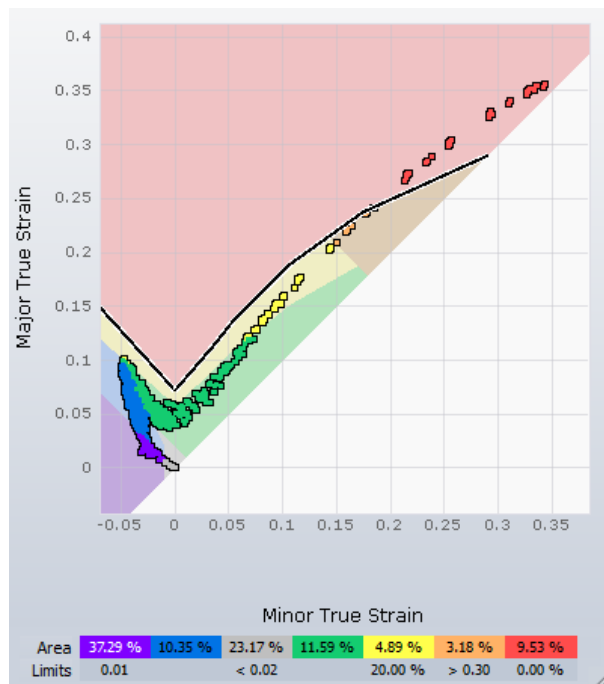
Obrázek 116 – Profil brzdné drážky

14.3 Výsledky simulace

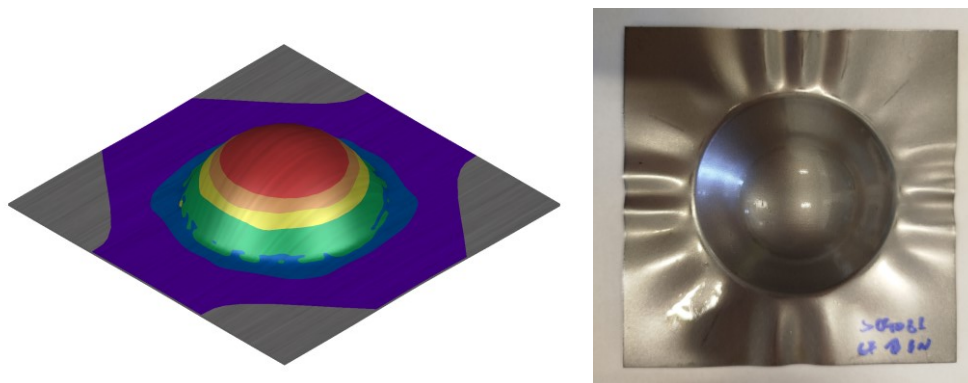
Z výsledků simulace je pro tuto práci důležitý FLD diagram, kvůli zobrazení kritických oblastí při tažení dílu. FLD diagram je rozdělen barevné škály, každá barva má svůj vlastní význam. Fialová barva značí oblast zvlnění materiálu, modrá oblast možného zvlnění materiálu, šedá je oblast bez přetvoření materiálu, zelená je bezpečná oblast přetvoření, žlutá je oblast s rizikem trhání, oranžová je oblast s nadměrným ztenčením materiálu a červená oblast značí vznik trhlin nebo prasklin.

14.3.1 Vyhodnocení simulace materiálu HCT980X a HCT980XG

Jelikož jsou materiály HCT980X a HCT980XG velice podobné co se týče mechanických vlastností, byla pro ně vytvořena jedna simulace bez brzdné drážky a jedna simulace s brzdou drážkou.

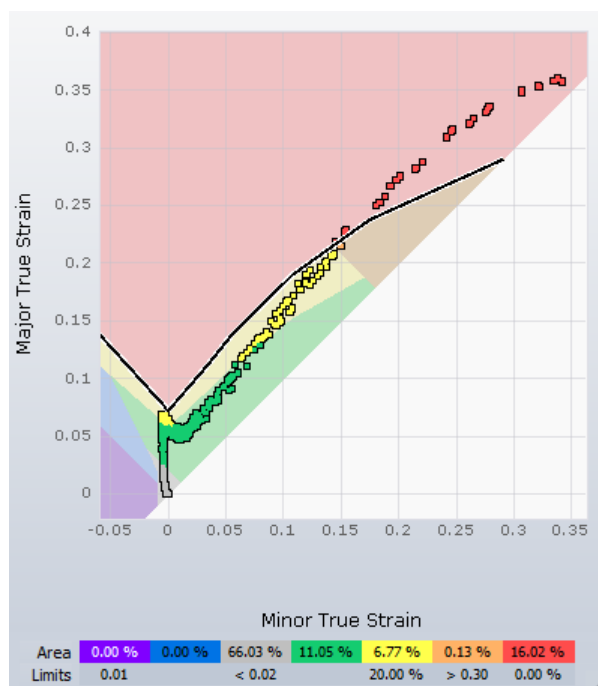


Obrázek 117 – FLD diagram pro HCT980X a HCT980XG bez brzdné drážky

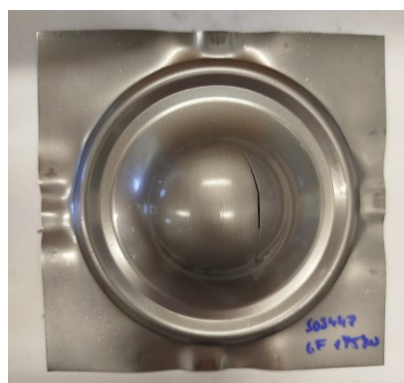
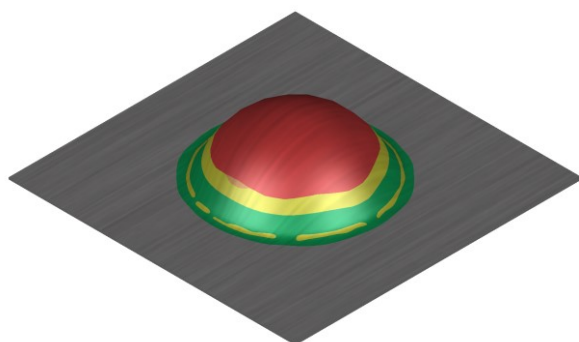


Obrázek 118 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HCT980X a HCT980XG bez brzdné drážky

Jak je na první pohled zřejmé, výsledky simulace jsou podobné reálným výsledkům tažení. Materiál na okrajích vzorku je zvlněný podobně jako na simulaci a prasklina vznikla u všech zkoušek buď v červené nebo oranžové oblasti.



Obrázek 119 – FLD diagram pro HCT980X a HCT980XG s brzdou drážkou

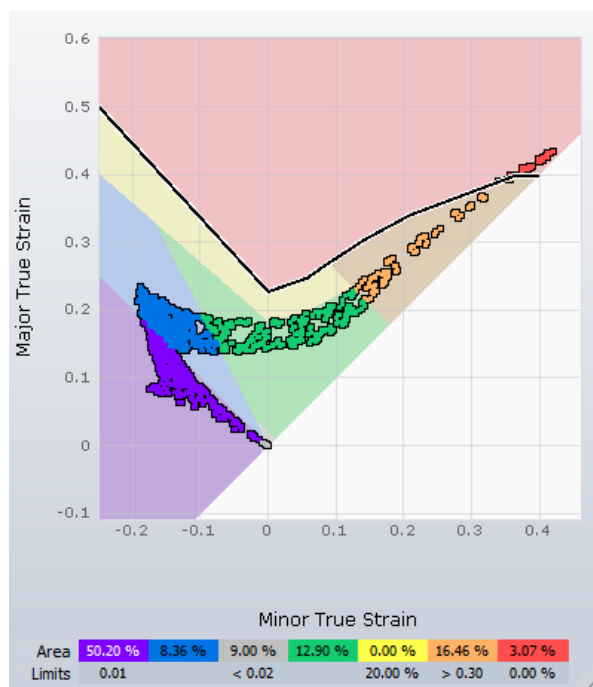


Obrázek 120 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HCT980X a HCT980XG s brzdou drážkou

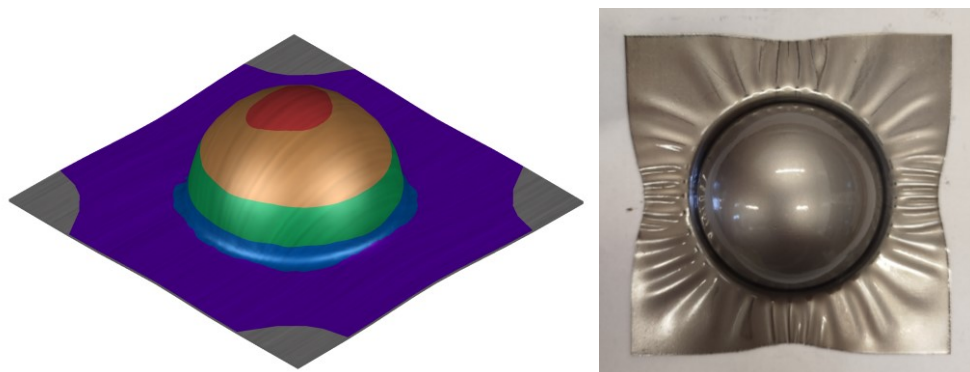
Simulace v zobrazení výsledků FLD neukazuje brzdou drážku, avšak materiál je tvářen přesně tak jako v realitě. Jediným rozdílem je zvlnění na okrajích, to je však způsobeno zalisováním drážky (vysokopevnostní plech není příliš tvárný, a tak se při zalisování drážky objevili zvlnění a ohyby). Toto zvlnění není tudíž viditelné na simulaci, protože nevzniká při procesu tažení.

14.3.2 Vyhodnocení simulace materiálu HC420LA

Simulace pro materiál HC420LA je identická předchozí simulaci, avšak využívá jiný materiálový model. Pro tuto simulaci byl využit materiálový model HY500, který disponuje podobnými mechanickými vlastnostmi jako HC420LA.

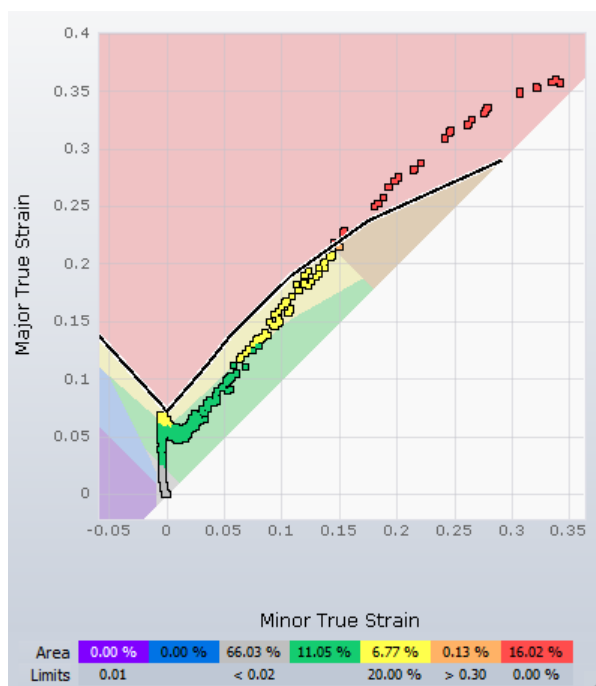


Obrázek 121 – FLD diagram pro HC420LA bez brzdné drážky

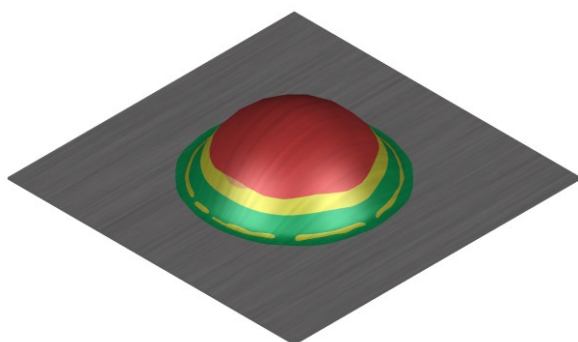


Obrázek 122 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HC420LA

Ze simulace je zřejmé, že HC420LA je v porovnání s HCT980X a HCT980XG mnohem tvárnější materiál. U tohoto materiálu vzniká poměrně velká oblast zvlnění materiálu při tažení bez brzdné drážky.



Obrázek 123 – FLD diagram pro HC420LA s brzdou drážkou



Obrázek 124 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HC420LA

Simulace je v případě HC420LA není úplně přesná kvůli tomu, že HY500 (materiálový model využitý pro simulaci) má vyšší pevnost. Bohužel materiálový model HC420LA se nepodařilo sehnat. Tudíž na simulaci nelze vidět zvlnění v okolí brzdové drážky.

15 DISKUZE VÝSLEDKŮ

V této práci byly vybrány tři různé materiály. Těmito materiály jsou HCT980X, HCT980XG a HC420LA. Jedná se o vysokopevnostní nebo také dual phase oceli (obsahují feriticko-martenzitickou strukturu se zbytkovým austenitem), používané zejména na tváření za studena. Tyto oceli byly podrobeny řadě testů.

Pro zkoumání mechanických vlastností materiálu bylo využito měření mikro-mechanických vlastností (vtisková tvrdost, tvrdost dle Vickerse, vtiskový modul a maximální hloubka vpichu). Po vyhodnocení těchto testů je zřejmé, že materiál HCT980XG je nejtvrdší, a tudíž nejvíce odolný vůči vniku cizích těles do jeho povrchu. To však může způsobovat problémy při tváření. Materiál HCT980X má přibližně o 12 % nižší mikro-mechanické vlastnosti jak materiál HCT980XG. Materiál HC420LA je ze zkoumaných materiálů nejměkčí. Rozdíl mezi HC420LA je poměrně výrazný oproti dalším dvěma, vtisková tvrdost a tvrdost dle Vickerse je o 40 % menší a vtiskový modul dokonce 73,9 %.

V dalších kapitolách bylo popsáno zařízení a nástroje použité pro zkoušky hlubokotažnosti. Jednalo se o tyto zkoušky: zkouška dle Erichsena a zkouška dle Nakajimi s a bez brzdné drážky. Dále byly zkoušky dle Nakajimi ještě větveny na variace síly na přidržovači, rychlosti tažení a variace aplikace maziva na polotovar.

Všechny testované materiály jsou vhodné pro hluboké tažení, protože splňují kritérium zkoušky dle Erichsena. Prasklina se při zkoušce objevuje po obvodu výtažku nikoliv na čele.

Při zkoušce dle Nakajimi bez brzdné drážky bylo obecně lepší pro všechny zkoumané materiály využít vyšší hodnoty síly na přidržovači ze zkoumaných intervalů kvůli zvlnění a vtahování materiál (7 kN nebo 10 kN pro HCT980X a HCT980XG a 40 kN pro HC420LA). V některých případech to nevedlo k nejvyšším výtažkům, avšak výtažek byl kvalitní bez zvlnění nebo jiných defektů. Dalším variovaným parametrem byla rychlost tažení. Materiál HCT980X a HCT980XG bylo vhodné táhnout nižšími rychlostmi ze zkoumaného intervalu (1 mm/s nebo 5 mm/s) zatím co materiál HC420LA bylo možné táhnout nejvyšší hodnotou zkoumaného intervalu (10 mm/s) bez vzniku defektů, výtažek byl také nejvyšší za této rychlosti tažení. Zkoušky s variací mazání materiálu byly jednoznačné. Materiál bez mazání je jen těžko tažen a je tedy vhodné mazat minimálně stranu polotovaru v kontaktu s tažníkem nebo rovnou obě strany polotovaru, což také značně prodlužuje životnost tažného nástroje. HCT980X a HC420LA lze říct, že tažení bez jakéhokoliv mazání je neefektivní a vede k poměrně nízkým výtažkům oproti dalším variantám.

Zkouška dle Nakajimi s brzdou drážkou představovala problém hlavně v ohledu určení nejvhodnější síly působící na přidržovači. Jelikož je materiál HCT980X a HCT980XG poměrně pevný, nastal problém s tvorbou brzdě drážky. Testovací stroj musel vyvinout značnou sílu na přidržovači vůbec, aby se drážka utvořila. Interval přidržovací síly tedy začínal na 100 kN pro tyto dva materiály (drážka byla i při této síle nedokonalá). Ze zkoumaného intervalu byla tudíž vybrána nejvyšší možná přidržovací síla jako nejvhodnější (200 kN). U materiálu HC420LA tento problém nenastal, nejvyšších výtažků bylo dosaženo při síle na přidržovači 25 kN. Rychlost tažení se u zkoušky s brzdou drážkou projevila jako poměrně podstatná procesní podmínka. Jelikož u materiálů HCT980X a HCT980XG bylo při vyšších rychlostech problém správně zaznamenat data posunutí tažníku a síly působící na tažníku musela být zkouška opakována, proto by bylo vhodné pro další zpracování či testování volit hodnotu rychlosti 1 mm/s. Materiál HC420LA podobně jako u zkoušky bez drážky bylo vhodné táhnout vyšší rychlostí, kvůli vyšším výtažkům a efektivitě procesu. Podobně jako u zkoušky bez brzdě drážky byla absence maziva na materiálu problém, co se týče výšky výtažků (a tím zbytečně způsobené opotřebení nástroje). Materiál je podle provedených testů třeba dostatečně mazat minimálně ze strany tažníku. U materiálů HCT980X a HC420LA lze říct, že tažení bez jakéhokoliv mazání je neefektivní a vede k poměrně nízkým výtažkům oproti dalším variantám.

Ke konci praktické části je také věnován čas simulacím procesu tažení. Simulace je vytvořena v softwaru AutoForm Forming R8. Je zde popsán postup tvorby těchto simulací a podmínky, které jsou do těchto simulací zadány. Simulace je vytvořena tak, aby kopírovala proces tažení při testování co nejvíce do detailu (ať už jde o model tažníku, materiál polotovaru, rozměry polotovaru až po brzdou drážku, její geometrii a vzdálenost od hrany tažnice). Výsledkem těchto simulací jsou modely se různými barevně odlišenými oblastmi, které ukazují rizika vzniku ztenčení materiálu, trhlin nebo vzniku zvlnění materiálu včetně FLD diagramu. Simulace tváření a reálné výsledky, ze zkoušek jsou víceméně identické s velmi malými rozdíly.

ZÁVĚR

Tato diplomová práce se zabývala problematikou hlubokého tažení plechů se zaměřením na procesní parametry, které ovlivňují průběh a výsledek tohoto tvářecího procesu. V teoretické části byly popsány principy hlubokého tažení, rozdělení této technologie, používané materiály, možné defekty a způsoby hodnocení tvárnosti materiálů, včetně využití FLD diagramů a simulačních metod.

Praktická část byla zaměřena na provedení experimentálních zkoušek (zkouška dle Erichsena a dvě varianty zkoušek dle Nakajimi) s cílem ověřit vhodnost vybraných materiálů pro hluboké tažení a posoudit vliv různých procesních podmínek, jako jsou síla na přidržovači, rychlost tažení a mazání. Výsledky byly zpracovány do přehledných tabulek a grafů, které umožnily porovnat chování jednotlivých materiálů za různých podmínek.

Z provedených zkoušek a simulací vyplynulo, že správná volba materiálu a optimalizace procesních parametrů mají zásadní vliv na kvalitu výtažku a bezproblémový průběh hlubokého tažení.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013. Učební texty vysokých škol (Vysoké učení technické v Brně). ISBN 978-802-1447-479.
- [2] DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Ladislav ŽÁK. *Technologie tváření: návody do cvičení*. Vyd. 2. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2005, 103 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 8021428813.
- [3] BÍLEK, Ondřej a Imrich LUKOVICS. *Výrobní inženýrství a technologie*. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati, 2014, 173 s. ISBN 9788074544712.
- [4] WANG, Darren. *Handbook of metal forming process*. New York: Research press, 2015. ISBN 978-1-63238-253-5.
- [5] IKUMAPAYI, Omolayo M., Sunday A. AFOLALU, Joseph F. KAYODE, Rasaq A. KAZEEM a Saheed AKANDE. A concise overview of deep drawing in the metal forming operation. *Materials Today: Proceedings*. 2022, **62**, 3233-3238. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.221>
- [6] BOLJANOVIC, Vukota. *Sheet Metal Forming Processes and Die Design (2nd Edition)*. Industrial Press, 2014. ISBN 978-0-8311-3492-1. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMFPDDEE/sheet-metal-forming-processes/sheet-metal-forming-processes>
- [7] NĚMEC, Milan, Jan SUCHÁNEK a Jan ŠANOVEC. *Základy strojírenské technologie I*. 3. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016, 160 s. ISBN 9788001060568.
- [8] HOSFORD, William F a Robert M CADDELL. *Metal forming: mechanics and metallurgy: mechanics and metallurgy*. New York: Cambridge university press, 2011. ISBN 978-1-107-00452-8.
- [9] AMINI, Afsoon, Hassan MOSLEMI NAEINI, Hamed DEILAMI AZODI, Hossein TALEBI-GHADIKOLAEI, Hassan BADPARVA a Ali ZEINOLABEDIN-BEYGI. Hydro-mechanical deep drawing of conical components: Wrinkling behavior and process enhancement: Wrinkling behavior and process enhancement. *Journal of Engineering Research*. 2024. ISSN 2307-1877. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.04.005>

- [10] ALTAN, Taylan a A. Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming - Processes and Applications*. ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-844-2. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMFPA001/sheet-metal-forming-processes-2/sheet-metal-forming-processes-2>
- [11] OLIVEIRA, Marta C. a José V. FERNANDES. Modelling and Simulation of Sheet Metal Forming Processes. *Metals* [online]. 2019, **9**(12) [cit. 2024-12-29]. ISSN 2075-4701. Dostupné z: doi:10.3390/met9121356
- [12] ALTAN, Tayla a A. Erman TEKKAYA. *Sheet Metal Forming - Fundamentals*. ASM International, 2012. ISBN 978-1-61503-842-8. Dostupné také z: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSMFF0001/sheet-metal-forming-fundamentals/sheet-metal-forming-fundamentals>
- [13] BANABIC, Dorel. *Sheet Metal Forming Processes: Constitutive Modelling and Numerical Simulation*. Berlín: Springer Science, 2010. ISBN 978-3-540-88113-1.
- [14] HUDA, Zainul. *Deep Drawing of Sheet Metal*. In: . Cham: Springer Nature Switzerland, 2024, s. 239-258. ISBN 978-3-031-56760-5. Dostupné z: doi:10.1007/978-3-031-56760-5_12
- [15] MURAOKA, Tsuyoshi. *Suppression of non-uniform deformation using die shape in cylindrical deep drawing*. Millersville: Materials Research Forum, 2024, s. -644, 635 s. Dostupné z: doi:10.21741/9781644903254-68
- [16] GROOVER, M.P. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems: Materials, Processes, and Systems*. John Wiley, 2010. ISBN 9780470467008. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=QU-Qvud3OvoC>
- [17] AMOSE, A, K FEMINA a Sivarajan SHANMUGASUNDARAM. Determination of optimum process parameters for minimum punch force in deep drawing using numerical simulation. *Journal of Physics: Conference Series*. 2023, **2601**, 012024. Dostupné z: doi:10.1088/1742-6596/2601/1/012024
- [18] TIWARI, Pushkar R., Akshay RATHORE a Mohan G. BODKHE. Factors affecting the deep drawing process – A review. *Materials Today: Proceedings*. 2022, **56**, 2902-2908. ISSN 2214-7853. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.189>

- [19] ARINBJARNAR, Úlfar, Philipp SCHUMANN, Jonas MOSKE, Alexander BREUNIG, Peter GROCHE a Chris V. NIELSEN. A review of methods and effects for improving production robustness in industrial micro-deep drawing. *International Journal of Material Forming*. 2024, **17**(3), 31. ISSN 1960-6214. Dostupné z: doi:10.1007/s12289-024-01832-0
- [20] DIXIT, U.S. a R.G. NARAYANAN. *Metal Forming: Technology and Process Modelling: Technology and Process Modelling*. McGraw Hill Education (India) Private Limited, 2013. ISBN 9781259058684. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=SVqFAAAAQBAJ>
- [21] ASGHARPOUR, Aliakbar, Hamid GORJI a Seyed DELPAZIR. Experimental and numerical investigation to determine the optimal blank-holder force in deep drawing process based on forming force for SS304L and St14 sheets. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2024, **46**. Dostupné z: doi:10.1007/s40430-024-04935-6
- [22] 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. ISBN 978-1-4471-4098-6.
- [23] KAIMKURIYA, Amit a Balaguru SETHURAMAN. Experimental and computational optimization of sheet metal forming parameters for cylindrical cups of Al1100 and SS202. *AIP Advances*. 2024, **14**. Dostupné z: doi:10.1063/5.0235139
- [24] BASAK, Shamik, Sushanta Kumar PANDA a Myoung-Gyu LEE. Formability and fracture in deep drawing sheet metals: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets: Extended studies for pre-strained anisotropic thin sheets. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2020, **170**, 105346. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105346>
- [25] BASAK, Shamik, Kaushik BANDYOPADHYAY, Sushanta Kumar PANDA a Partha SAHA. *Prediction of Formability of Bi-axial Pre-strained Dual Phase Steel Sheets Using Stress-Based Forming Limit Diagram*. In: . New Delhi: Springer India, 2015, s. 167-192. ISBN 978-81-322-2355-9. Dostupné z: doi:10.1007/978-81-322-2355-9_8

- [26] ZHANG, Ling, Junying MIN, John E. CARSLY, Thomas B. STOUGHTON a Jianping LIN. Experimental and theoretical investigation on the role of friction in Nakazima testing. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2017, **133**, 217-226. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.08.020>
- [27] BUTUC, Marilena C., Gabriela VINCZE, Rafael SANTOS, António PEREIRA, Abel D. SANTOS, Rui L. AMARAL a Frederic BARLAT. Formability of third generation advanced high strength steel: experimental and theoretical approach: experimental and theoretical approach. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2024, **281**, 109559. ISSN 0020-7403. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2024.109559>
- [28] MIANROODI, Mohammad. *Experimental and numerical CPFEM-based determination of FLD using biaxial and Nakajima tests: industrial application to deep drawing simulation for FCC and BCC metals: industrial application to deep drawing simulation for FCC and BCC metals*. 2021. Dostupné z: doi:[10.13140/RG.2.2.21649.51044](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.21649.51044)
- [29] PHAM, Quoc Tuan, Md Shafiqul ISLAM, Mats SIGVANT, Lluís Pérez CARO, Myoung-Gyu LEE a Young-Suk KIM. Improvement of modified maximum force criterion for forming limit diagram prediction of sheet metal. *International Journal of Solids and Structures*. 2023, **273**, 112264. ISSN 0020-7683. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2023.112264>
- [30] KUCZEK, Łukasz, Marcin MROCZKOWSKI a Paweł TUREK. Investigation of deep drawability of 6082 aluminium alloy sheet for automotive applications after various heat treatment conditions. *Archive of Mechanical Engineering*. 2023, **70**, 107-128. Dostupné z: doi:[10.24425/ame.2023.144816](https://doi.org/10.24425/ame.2023.144816)
- [31] CHEN, Yong, Hong YAN, Dan WANG a Rong-shi CHEN. Microstructure evolution and deformation mechanism of Mg–Zn–Gd sheet during Erichsen cupping test. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. 2023, **33**(3), 728-742. ISSN 1003-6326. Dostupné z: doi:[https://doi.org/10.1016/S1003-6326\(22\)66141-7](https://doi.org/10.1016/S1003-6326(22)66141-7)
- [32] ROSA-SAINZ, A., I. FERRER, M.L. GARCIA-ROMEU a G. CENTENO. Characterization of plastic formability and failure mechanisms in FDM additively manufactured PETG and PCL sheets. *Polymer Testing*. 2024, **134**, 108431. ISSN 0142-9418. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2024.108431>

- [33] AKŞEN, Toros Arda, Bora ŞENER, Emre ESENER, Ümit KOCABIÇAK a Mehmet FIRAT. Fracture forming limit curve prediction by ductile fracture models. *Procedia Structural Integrity*. 2024, **61**, 268-276. ISSN 2452-3216. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.06.034>
- [34] SAMPAIO, Rui F.V., João P.M. PRAGANA, Ivo M.F. BRAGANÇA, Carlos M.A. SILVA a Paulo A.F. MARTINS. Introducing a novel sheet test specimen for biaxial stretching under uniaxial loading. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2024, **8**, 100141. ISSN 2666-9129. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.aime.2024.100141>
- [35] MAHALLE, Gauri, Nitin KOTKUNDE, Amit Kumar GUPTA a Swadesh Kumar SINGH. An improved M–K model coupled with different ductile criteria for fracture limit predictions of Inconel 718 alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2021, **11**, 1162-1174. ISSN 2238-7854. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2021.01.092>
- [36] MÜLLER, Martina, Lars UHLMANN, Tim HERRIG a Thomas BERGS. Numerical analysis of the dependence of damage on friction during deep drawing of asymmetric geometries. *Advances in Industrial and Manufacturing Engineering*. 2024, **8**, 100136. ISSN 2666-9129. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.aime.2024.100136>
- [37] WAHEED, Shaik, P. VARDHAN, D. REDDY a B. KRISHNA. Design and Analysis of Deep Drawing for a Utility Cup. *International Journal of Innovative Science and Research Technology (IJISRT)*. 2024, 321-329. ISSN 2456-2165. Dostupné z: doi:[10.38124/ijisrt/IJISRT24OCT090](https://doi.org/10.38124/ijisrt/IJISRT24OCT090)
- [38] NIZAM, Maruf. Wrinkling Defect in Sheet Metal Process using Finite Element Analysis. *International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology*. 2022, **10**, 4421-4429. Dostupné z: doi:[10.22214/ijraset.2022.44947](https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.44947)
- [39] ZWICK/ROELL. *Informace o produktu BUP 400 / BUP 600* [online]. [cit. 29.3.2025]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/fileadmin/content/Files/SharePoint/user_upload/PI_EN/11_933_BUP_400_BUP_600_testControl_II_PI_EN.pdf

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1 – Schéma hlubokého tváření [6].....	18
Obrázek 2 – Schéma metody Guerin [6].....	19
Obrázek 3 – Schéma metody Marform [6]	19
Obrázek 4 – Schéma metody Hydroform s tvárníkem [6]	20
Obrázek 5 – Schéma metody Hydroform s tvárnicí [6]	20
Obrázek 6 – Geometrie nástroje [12].....	21
Obrázek 7 – Typy mazání při hlubokém tažení [19]	23
Obrázek 8 – Zvlnění materiálu na přírubě (vlevo) a na obvodu (vpravo) [16].....	27
Obrázek 9 – Žehlení [16]	28
Obrázek 10 – Odírání [16]	28
Obrázek 11 – Earing [16].....	29
Obrázek 12 – Zúžení materiálu (vlevo) a lokální zúžení materiálu (vpravo) [8]	30
Obrázek 13 – Vznik praskliny [16].....	30
Obrázek 14 – FLD dle Keelera [13].....	35
Obrázek 15 – Rozdělení analytického řešení FLD podle teorií [28]	36
Obrázek 16 – Schéma využití FLD diagramu v praxi [13].....	38
Obrázek 17 – Vliv tloušťky tvářeného plechu na FLD [13]	39
Obrázek 18 – FLD se změnou deformační dráhy [8].....	40
Obrázek 19 – Schéma zkoušky dle Erichsena [8].....	41
Obrázek 20 – Výsledek zkoušky dle Erichsena [1]	42
Obrázek 21 – Schéma zkoušky dle Engelhard-Grosse [30].....	42
Obrázek 22 – Výsledek zkoušky dle Engelhard-Grosse [30]	43
Obrázek 23 – Schéma zkoušky dle Fukui [30]	43
Obrázek 24 – Tvárníky zkoušky dle Keelera [13]	44
Obrázek 25 – Sada zkušebních těles zkoušky dle Nakajimi [13]	45
Obrázek 26 – Zkušební tělesa zkoušky dle Haska [13]	45
Obrázek 27 – Schéma hydraulické zkoušky vyboulení [13].....	46
Obrázek 28 – Schéma zkoušky dle Marciniaka [13]	46
Obrázek 29 – Porovnání různých druhů zkoušek v FLD diagramu [13]	47
Obrázek 30 – MicroCombi Tester (MCT ³) od společnosti CSM	54
Obrázek 31 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro vtiskovou tvrdost (H_{IT}).....	55
Obrázek 32 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro tvrdost dle Vickerse (HV_{IT}) ...	56
Obrázek 33 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro vtiskový modul (E_{IT}).....	57

Obrázek 34 – Grafické zobrazení naměřených hodnot pro maximální hloubku vpichu (H_{MAX}).....	58
Obrázek 35 – Testovací zařízení BUP 600 [39]	59
Obrázek 36 – Tažnice pro zkoušku dle Erichsena	60
Obrázek 37 – Přidržovač pro zkoušku dle Erichsena	61
Obrázek 38 – Tažnice pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky	62
Obrázek 39 – Tažník pro zkoušku dle Nakajimi	62
Obrázek 40 – Přidržovač pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky	62
Obrázek 41 – Tažnice pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou	63
Obrázek 42– Přidržovač pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou.....	63
Obrázek 43 – Diagram provedených zkoušek	64
Obrázek 44 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Erichsena ..	65
Obrázek 45 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Erichsena.	65
Obrázek 46 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Erichsena ..	66
Obrázek 47 – Výsledek zkoušky dle Erichsena.....	66
Obrázek 48 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (3 kN)	68
Obrázek 49 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (3 kN)	68
Obrázek 50 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (5 kN)	68
Obrázek 51 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (5 kN)	69
Obrázek 52 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (5 kN)	69
Obrázek 53 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (10 kN)	70
Obrázek 54 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (7 kN)	70
Obrázek 55 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (7 kN)	71
Obrázek 56 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (20 kN)	71
Obrázek 57 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (10 kN)	72
Obrázek 58 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (10 kN)	72
Obrázek 59 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzdné drážky (40 kN)	72

Obrázek 60 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty síly působící na přidržovací bez brzděné drážky	73
Obrázek 61 – Zvlnění materiálu při příliš nízké síle na přidržovači při testování materiálu HC420LA (1 kN nalevo, 3 kN uprostřed, 5 kN napravo).....	74
Obrázek 62 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)	75
Obrázek 63 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)	75
Obrázek 64 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (1 mm/s)	75
Obrázek 65 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 mm/s)	76
Obrázek 66 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 mm/s)	76
Obrázek 67 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (10 mm/s)	77
Obrázek 68 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty rychlosti tažení bez brzděné drážky	78
Obrázek 69 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)	79
Obrázek 70 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)	79
Obrázek 71 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (bez maziva)	79
Obrázek 72 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (mazivo tažník).....	80
Obrázek 73 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (mazivo tažník).....	80
Obrázek 74 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi bez brzděné drážky (mazivo tažník).....	81
Obrázek 75 – Průměrná výška výtažku pro různé variace mazání polotovaru bez brzděné drážky	81
Obrázek 76 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzděnou drážkou (100 kN).....	82
Obrázek 77 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzděnou drážkou (100 kN).....	83
Obrázek 78 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzděnou drážkou (25 kN).....	83
Obrázek 79 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzděnou drážkou (150 kN).....	84
Obrázek 80 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzděnou drážkou (150 kN).....	84

Obrázek 81 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (50 kN)	84
Obrázek 82 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (175 kN)	85
Obrázek 83 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (175 kN)	85
Obrázek 84 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (75 kN)	86
Obrázek 85 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (200 kN)	86
Obrázek 86 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (200 kN)	87
Obrázek 87 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (100 kN)	87
Obrázek 88 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty síly působící na přidržovací s brzdou drážkou	88
Obrázek 89 – Rozdíl vytvoření drážky s nízkou hodnotou síly na přidržovači (nalevo) a vyšší hodnotou síly (napravo)	88
Obrázek 90 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)	89
Obrázek 91 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)	89
Obrázek 92 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (1 mm/s)	90
Obrázek 93 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)	90
Obrázek 94 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)	91
Obrázek 95 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (10 mm/s)	91
Obrázek 96 – Průměrná výška výtažku pro různé hodnoty rychlosti tažení s brzdou drážkou	92
Obrázek 97 – Rozdíl rychlosti tažení a následného vzniku prasklin na vzorku 10 mm/s (napravo) a 1 mm/s (nalevo)	92
Obrázek 98 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)	93
Obrázek 99 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)	93
Obrázek 100 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (bez maziva)	94
Obrázek 101 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980X pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník)	94

Obrázek 102 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HCT980XG pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník).....	95
Obrázek 103 – Závislost F_{Break} na H_{Break} pro ocel HC420LA pro zkoušku dle Nakajimi s brzdou drážkou (mazivo tažník).....	95
Obrázek 104 – Průměrná výška výtažku pro různé variace mazání polotovaru s brzdou drážkou.....	96
Obrázek 105 – Model tažníku z různých pohledů	97
Obrázek 106 – Importovaný a zrcadlený model tažníku	98
Obrázek 107 – Materiálový model DualPhase 980 z AutoForm	99
Obrázek 108 – Plán operací simulace	99
Obrázek 109 – Ploché přidržovač pro simulaci tažení	100
Obrázek 110 – Nastavení síly na přidržovači	100
Obrázek 111 – Addendum pro tažení	101
Obrázek 112 – Profil addenda v průřezu	101
Obrázek 113 – Polotovar pro simulaci.....	102
Obrázek 114 – Nastavení rozměrů polotovaru	102
Obrázek 115 – Poloha brzdé drážky na výrobku	103
Obrázek 116 – Profil brzdé drážky	103
Obrázek 117 – FLD diagram pro HCT980X a HCT980XG bez brzdé drážky	104
Obrázek 118 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HCT980X a HCT980XG bez brzdé drážky	104
Obrázek 119 – FLD diagram pro HCT980X a HCT980XG s brzdou drážkou	105
Obrázek 120 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HCT980X a HCT980XG s brzdou drážkou.....	105
Obrázek 121 – FLD diagram pro HC420LA bez brzdé drážky	106
Obrázek 122 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HC420LA.....	106
Obrázek 123 – FLD diagram pro HC420LA s brzdou drážkou.....	107
Obrázek 124 – Porovnání výsledku simulace (napravo) a výsledku reálné zkoušky (nalevo) HC420LA.....	107

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 – Rychlost tažení pro různé kovové materiály [12].....	25
Tabulka 2 – Chemické složení oceli HCT980X	52
Tabulka 3 – Chemické složení oceli HCT980XG	53
Tabulka 4 – Chemické složení oceli HC420LA	53
Tabulka 5 – Naměřené hodnoty pro vtiskovou tvrdost (H_{IT})	55
Tabulka 6 – Naměřené hodnoty pro tvrdost dle Vickerse (HV_{IT})	56
Tabulka 7 – Naměřené hodnoty pro vtiskový modul (E_{IT}).....	57
Tabulka 8 – Naměřené hodnoty pro maximální hloubku vpichu (H_{MAX}).....	58
Tabulka 9 – Naměřené hodnoty pro zkoušku dle Erichsena	65
Tabulka 10 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 3 kN / 3 kN / 5 kN.....	67
Tabulka 11 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 5 kN / 5 kN / 10 kN.....	69
Tabulka 12 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 7 kN / 7 kN / 20 kN.....	70
Tabulka 13 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 10 kN / 10 kN / 40 kN.....	71
Tabulka 14 – Hodnoty pro rychlost tažení 1 mm/s.....	74
Tabulka 15 – Hodnoty pro rychlost tažení 10 mm/s.....	76
Tabulka 16 – Hodnoty pro měření bez maziva	78
Tabulka 17 – Hodnoty pro měření s mazivem pouze na straně tažníku	80
Tabulka 18 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 100 kN / 100 kN / 25 kN.....	82
Tabulka 19 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 150 kN / 150 kN / 50 kN.....	83
Tabulka 20 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 175 kN / 175 kN / 75 kN.....	85
Tabulka 21 – Hodnoty pro sílu působící na přidržovači 200 kN / 200 kN / 100 kN.....	86
Tabulka 22 – Hodnoty pro rychlost tažení 1 mm/s.....	89
Tabulka 23 – Hodnoty pro rychlost tažení 10 mm/s.....	90
Tabulka 24 – Hodnoty pro měření bez maziva	93
Tabulka 25 – Hodnoty pro měření s mazivem pouze na straně tažníku	94

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

FLC	Křivka mezní tvářitelnosti	[-]
FLD	Diagram mezního tváření	[-]
DP	Dual phase steel (dvoufázová ocel)	[-]
R_p	Mez kluzu	[MPa]
R_m	Mez pevnosti v tahu	[MPa]
H_{IT}	Vtisková tvrdost	[MPa]
HV_{IT}	Tvrdost dle Vickerse	[HV]
E_{IT}	Vtiskový modul	[GPa]
H_{MAX}	Maximální hloubka vpichu	[nm]
F_{Break}	Síla působící na tažník při přetržení	[kN]
H_{Break}	Posunutí tažníku při přetržení	[mm]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Materiálový list oceli HCT980X

Příloha P II: Materiálový list oceli HCT980XG

Příloha P III: Materiálový list oceli HC420LA

PŘÍLOHA P I: MATERIÁLOVÝ LIST OCELI HCT980X



HCT980X (HC600XD, CR590Y980T-DP)

Multi-phase steel for cold forming –
Dual-phase steel

Material no.	1.0944
according to	SZFG Werkstoffblatt 11-980
IMDS: HCT980XD	9621293
IMDS: HC600XD	477984845
IMDS: CR590Y980T-DP	216668445
according to	DIN EN 10346 (Okt 15)
according to	DIN EN 10143 (Sept 06)
according to	VDA 239-100

Dual-phase steel with low yield strength

General Information

Dual phase steel (DP steel) is a steel with a ferritic and martensitic matrix. With increasing strength it can contain bainite as a second phase. Remnants of austenite may be present. DP steels combine a very low elastic limit with very high tensile strength and a high degree of cold hardening. They are characterized by good cold formability.

After the oxygen blowing process in the converter, the steel is melted and submitted to an alloying treatment in the secondary metallurgy. It is aluminum-killed and achieves its high tensile strength with the defined addition of e.g. manganese, chromium, molybdenum or silicon as well as other micro-alloying elements. The mechanical properties are adjusted by controlled raising and lowering of temperature in the continuous heat treatment unit.

Chemical composition

(melt analysis in percent by weight)

	min.	max.
C		0,115 %
Si		0,650 %
Mn		2,350 %
P		0,040 %
S		0,0050 %
Al	0,015 %	0,060 %
Cr+Mo		1,000 %
Nb+Ti		0,120 %
V		0,060 %
B		0,0030 %
Cu		0,150 %

The material is described as low-carbon (LCE) with a max. of 0.115 %. With a carbon equivalent CEV(IIV) of max. 0.65 % it can be described as reduced.

Synonym: LCE = Low Carbon Equivalent

CEV(IIV): $C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

Mechanical properties

(as-delivered)

Yield strength $R_{p0.2}$ (transverse/longitudinal)
600 – 750 MPa / 590 – 740 MPa
Tensile strength R_m (transverse/longitudinal)
980 – 1130 MPa ¹⁾ / 980 – 1130 MPa
Total elongation A_{80} (transverse/longitudinal)
≥ 10 % / ≥ 10 %
Bake-hardening BH_2 (transverse/longitudinal)
≥ 30 / ≥ 30

¹⁾ A tensile strength of 980 – 1100 MPa is available on request.

The samples for the tensile test are taken at right angles to rolling direction (DIN EN 10346, VDA 239-100). Transverse samples are available on request. Because the stability of mechanical properties may depend on time (dual-phase steels tend to natural aging), the consumer should process the products as soon as possible. The mechanical values are guaranteed for a maximum of three months after delivery of the material.

Available dimensions

Thickness in mm	Width in mm
1,00 – 2,00 ²⁾	900 – 1.350

²⁾ Thicknesses from 2,00 mm to 3,00 mm on request

Form of delivery

This grade of sheet steel is supplied as hot galvanized sheet (cold-rolled sheet carrier material) in the surface type MB or U ("unexposed") with PRETEX® texturing in accordance with the available material sheet 11-980 (based on DIN EN 10346).

The delivery is subject to the conditions of DIN EN 10021 in combination with the dimensioning standard DIN EN 10143 or special conditions if arranged.

The test unit amounts to 20 t or every part of 20 t of products of the same grade of steel and nominal thickness. The test unit for strip stock is the coil.

The strip width as wide strip is 900 mm to 1,350 mm.

Slit strip dimensions can be delivered after agreement.



Salzgitter Flachstahl GmbH · Eisenhüttenstraße 99 · 38239 Salzgitter
Phone +49 (0) 5341 21-2890 · Telefax +49 (0) 5341 21-8536
E-Mail flachstahl@salzgitter-ag.de · <http://www.salzgitter-flachstahl.de>

PŘÍLOHA P II: MATERIÁLOVÝ LIST OCELI HCT980XG



**SALZGITTER
FLACHSTAHL**

A Member of the Salzgitter Group

CR700Y980T-DP (HCT980XG*)

Multi-phase steel for cold forming -
Dual-phase steel

Material no.	-
Materialinformationsblatt (MIB)	
according to	DIN EN 10143 (Sept 06)
according to	VDA 239-100
	* DIN EN 10346

Dual-phase steel with high yield strength

General Information

Dual phase steel (DP steel) is a steel with a ferritic and martensitic matrix. With increasing strength it can contain bainite as a second phase. Remnants of austenite may be present. DP steels combine a very low elastic limit with very high tensile strength and a high degree of cold hardening. They are characterized by good cold formability.

After the oxygen blowing process in the converter, the steel is melted and submitted to an alloying treatment in the secondary metallurgy. It is aluminum-killed and achieves its high tensile strength with the defined addition of e.g. manganese, chromium, molybdenum or silicon as well as other micro-alloying elements. The mechanical properties are adjusted by controlled raising and lowering of temperature in the continuous heat treatment unit.

Chemical composition¹⁾

(melt analysis in percent by weight)

	min. in %	max. in %
C		0,23
Si		1,0
Mn		2,90
P		0,050
S		0,010
Al	0,015	1,0
Cr+Mo		1,40
Nb+Ti		0,15
B		0,005
Cu		0,20

The material is described as low-carbon (LCE) with a max. of 0.115 %. With a carbon equivalent CEV(HIW) of max. 0.65 % it can be described as reduced.

Synonym: LCE = Low Carbon Equivalent

CEV(HIW): $C + Mn/6 + (Cu + Ni)/15 + (Cr + Mo + V)/5$

1) Heat analysis

Mechanical properties

(as-delivered)

Yield strength $R_{p0.2}$ in Mpa

700 - 850

Tensile strength R_m in Mpa

980 - 1,130²⁾

Total elongation A_{80} in %

≥ 8

Bake-hardening BH₂

≥ 30

2) According to VDA 239-100

The samples for the tensile test are taken along the rolling direction. Transverse samples are available on request. Because the stability of mechanical properties may depend on time (dual-phase steels tend to natural aging), the consumer should process the products as soon as possible. The mechanical values are guaranteed for a maximum of three months after delivery of the material.

Available dimensions

Thickness in mm	Width in mm
1.00 - 1.20	900 - 1,250
1.21 - 2.00 ³⁾	900 - 1,350

3) Thicknesses from 2.00 mm to 3.00 mm on request.



**SALZGITTER
FLACHSTAHL**
A Member of the Salzgitter Group

Salzgitter Flachstahl GmbH / Eisenhüttenstraße 99 / 38239 Salzgitter
PHONE +49(0)53 41 21 28 90 / FAX +49(0)53 41 21 85 36 / MAIL flachstahl@salzgitter-ag.de
www.salzgitter-flachstahl.de

PŘÍLOHA P III: MATERIÁLOVÝ LIST OCELI HC420LA



**SALZGITTER
FLACHSTAHL**

A Member of the Salzgitter Group

HC420LA

Micro-alloyed steel grades
with high yield strength for cold forming

Material no.	1.0556
according to	DIN EN 10268, Edition 10/06

Chemical composition¹⁾ (in percent by weight)

	min. in %	max. in %
C		0.1
Si		0.5
Mn		1.6
P		0.025
S		0.025
Al	0.015	
Nb		0.09 ²⁾
Ti		0.15 ²⁾

1) Heat analysis

2) These additional elements may be added single or in combination, if they are contained in the specification of the steel grade and the mass fraction being within the permissible limits. Vanadium can also be added. The total of the mass fractions of all three elements shall not exceed 0.22%.

Mechanical properties (transverse)

Yield strength $R_{eL}/R_{p0.2}$ in MPa
400 – 500
Tensile strength R_m in MPa
470 – 590
Total elongation A_{gg} in %
≥18

Products according to this European Standard must meet the requirements for transverse test pieces as given in table 2.

It may be agreed that the requirements for longitudinal test pieces, as given in table 3, shall be valid instead of those for transverse test pieces.

Available dimensions

Thickness in mm	Width in mm
0.60 – 0.69	1,000 – 1,500
0.70 – 1.39	900 – 1,600
1.40 – 2.00	900 – 1,700
2.01 – 2.35	900 – 1,600
2.36 – 3.00	900 – 1,500

Surface finish

The steel grade is available in the surface finishes A and O3.

Commitments regarding certain properties or a certain purpose of use require written agreements. Technical changes as well as typesetting and printing errors reserved.



**SALZGITTER
FLACHSTAHL**
A Member of the Salzgitter Group

Salzgitter Flachstahl GmbH / Eisenhüttenstraße 99 / 38239 Salzgitter
PHONE +49(0)53 41 21 28 90 / FAX +49(0)53 41 21 85 36 / MAIL flachstahl@salzgitter-ag.de
www.salzgitter-flachstahl.de