

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta strojní
Ústav strojírenské technologie



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
**VLIV ZPŮSOBU PŘÍPRAVY ZKUŠEBNÍHO VZORKU
NA DEFORMACE ZJIŠŤOVANÉ SYSTÉMEM ARAMIS**

Autor: Tomáš Kříž
Studijní program: Výroba a ekonomika ve strojírenství
Obor: Technologie, materiály a ekonomika strojírenství
Vedoucí práce: Ing. František Tatíček Ph.D.

Praha 2019

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kříž** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **466685**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**
Studijní program: **Výroba a ekonomika ve strojírenství**
Studijní obor: **Technologie, materiály a ekonomika strojírenství**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv způsobu přípravy zkušebního vzorku na deformace zjišťované systémem ARAMIS

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of test specimen preparation on deformations detected by ARAMIS system

Pokyny pro vypracování:

- 1) seznámení s problematikou
- 2) tvářitelnost v plošném tváření
- 3) materiály používané pro stavbu karoserie automobilu
- 4) návrh experimentu
- 5) závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

dle doporučení vedoucího BP

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:


Ing. František Tatiček, Ph.D., ústav strojírenské technologie FS


Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání bakalářské práce: **05.08.2019**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2019**


Ing. František Tatiček, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce


doc. Ing. Ladislav Kolařík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

2.5.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení:

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracoval samostatně, pod odborným dohledem vedoucího Ing. Františka Tatíčka Ph.D. Práce je vypracována na základě materiálů uvedených v seznamu použité literatury.

V Praze dne 4. 8. 2019

.....

Tomáš Kříž

Poděkování:

Mé poděkování patří Ing. Františku Tatíčkoví Ph.D. za odborné rady, cenné připomínky, vstřícnost a čas, který mi poskytl nejen při zpracování mé bakalářské práce, ale i v průběhu studia. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Vítu Novákovi a Ing. Michalu Valešovi za jejich pomoc při přípravě zkušebních vzorků a realizaci měření.

V neposlední řadě bych rád poděkoval svým rodičům za velikou podporu během celého studia a závěrem děkuji své přítelkyni za to, že mi byla psychickou oporou v náročných chvílích studia.

Anotace

Vysoká škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Název bakalářské práce:	Vliv způsobu přípravy zkušebního vzorku na deformace zjišťované systémem ARAMIS.
Akademický rok:	2018/2019
Autor:	Tomáš Kříž
Vedoucí práce:	Ing. František Tatíček Ph. D.

Abstrakt:

Teoretická část bakalářské práce se zabývá tvářením, zejména pak tvářitelností a faktory, jimiž je ovlivňována. Jsou zde stručně popsány zkoušky v praxi používané ke stanovení tvářitelnosti a dalších mechanických vlastností materiálů. Jelikož se práce dále zabývá zkoušením plechů, nechybí zde ani kapitola stručně popisující plechy používané v automobilovém průmyslu. Určité zkoušky slouží k vytvoření křivek mezní tvářitelnosti, které jsou jedním z faktorů ovlivňující tvářitelnost. Je zde zahrnut popis metodiky a zařízení k vyhodnocování zkouškami získaných dat. Výrobu vzorků pro tyto zkoušky upravují poměrně přísné normované předpisy. Experimentální část práce se zaměřuje na to, jak velký vliv mohou mít normou dané podmínky na výsledky zkoušek v porovnání s jinými, méně přísnými, způsoby výroby zkušebních vzorků.

Klíčová slova: Tváření, tvářitelnost, zkoušky materiálů, křivky mezních deformací, systém ARAMIS, zkouška Nakajima

Rozsah práce a příloh

Počet stran:	67
Počet obrázků:	36
Počet tabulek:	6

Annotation

University: CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
Department: Department of Manufacturing Technology
Title of work: Influence of test specimen preparation
on deformations detected by ARAMIS system
Academic year: 2018/2019
Author: Tomáš Kříž
Supervisor: Ing. František Tatíček Ph. D.

Abstract:

Theoretical part of this bachelor thesis describes forming of metals, particularly their formability and factors that have an impact on it. There are briefly described practical tests used to formability assessment and other mechanical properties of materials. Due to the topic of this thesis a chapter about metal sheets that are used in automotive industry is included. Some tests are used to create forming limit curves. These curves are one of the factor that has an effect on formability. There is a description of methods and equipment used to analyze data from the tests. A production of test samples is strictly regulated by norms. The aim of the experimental part of this thesis is to compare how different ways of the production of test specimens affect the test results.

Keywords: Forming, formability, tests of materials, forming limit curves, ARAMIS system, Nakajima test

Volume of bachelor thesis

Number of pages: 67
Number of images: 36
Number of tables: 6

Obsah

1	Úvod.....	10
2	Tváření a tvářitelnost	11
2.1	Faktory ovlivňující tvářitelnost	11
2.1.1	Metalurgické faktory.....	11
2.1.2	Mechanické faktory.....	12
2.1.3	Termomechanické faktory.....	12
2.1.4	Technologické faktory.....	12
2.2	Určování tvářitelnosti.....	13
2.2.1	Zkouška tahem.....	13
2.2.2	Součinitel plastické anizotropie	14
2.2.3	Exponent deformačního zpevnění.....	15
2.2.4	Další zkoušky.....	15
2.3	Technologické zkoušky.....	17
2.3.1	Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena	17
2.3.2	Zkouška kalíškovací.....	18
2.3.3	Zkouška rozšiřováním otvoru	19
2.3.4	Zkouška střídavým ohýbáním.....	19
2.3.5	Zkouška dvojitým ohybem	20
2.3.6	Zkouška lámavosti	20
2.3.7	Zkouška tažením v kuželové tažnici	21
2.3.8	Zkouška hydraulická (Tomlenova zkouška).....	21
2.3.9	Zkouška Nakajima	22
3	Materiály pro výrobu karoserie	23
3.1	Oceli pro hluboké tažení	23
3.2	Oceli bez volných intersticiálů	24
3.3	Bake hardening oceli	24

3.4	Mikrolegované HSLA oceli	24
3.5	Vysoko – pevnostní oceli (AHSS).....	24
3.6	Ultra vysoko – pevnostní oceli (UHSS).....	25
3.7	Materiál použitý v experimentální části práce	26
4	Křivky mezní tváritelnosti.....	27
4.1	Metody vyhodnocování zásoby plasticity.....	27
4.2	Princip zkoušení dle Nakajima	27
4.3	Keeler – Goodwinův diagram	28
4.4	Tvar zkušebních těles.....	31
4.5	Vyhodnocování deformace	32
4.5.1	Systém ARAMIS	32
4.5.2	Princip měření.....	33
5	Návrh experimentu	35
5.1	Tvar zkušebních vzorků	35
5.2	Způsob přípravy zkušebních vzorků.....	35
5.3	Vytvoření stochastické sítě bodů.....	37
5.4	Podmínky zkoušení.....	39
5.5	Průběh zkoušky	40
5.6	Vyhodnocování naměřených dat	45
5.6.1	Naměřená data pro výrobu vzorků broušením.....	47
5.6.2	Naměřená data pro vzorky vyrobené pomocí laseru.....	48
5.6.3	Naměřená data pro vzorky vyrobené vykružováním	49
6	Zhodnocení naměřených dat	50
7	Závěr	52
	Seznam použité literatury	54
	Seznam obrázků	57
	Seznam tabulek	59

Příloha 1 – Tvar zkušebních vzorků	60
Příloha 2 – tvar zkušebních vzorků s přídavkem.....	63
Příloha 3	66
Příloha 4	67

1 Úvod

Pro úspěšnou výrobu technologií označovanou jako tváření je nezbytné co nejpodrobněji popsat proces samotný, stejně tak chování materiálu při tvářecím procesu. V dnešním světě moderních technologií jsou tyto informace důležité například pro potřeby numerických simulací. Aby však byly simulace přesné a výsledky odpovídaly realitě, je třeba co nejpresněji definovat všechny faktory, které mají na tváření vliv. S touto problematikou také souvisí maximální dosažitelná úroveň využití materiálu. Při tváření se materiál deformuje až na samé hranice tvářitelnosti, a pokud by při numerické simulaci zmíněné hranice nebyly přesně určeny, docházelo by v reálném výrobním procesu k častému porušení celistvosti tvářených dílů a obecně by rostla neshodnost výlisků.

Jednou skupinou ovlivňující tvářitelnost materiálu jsou křivky mezních přetvoření, označované písmeny FLC z anglického forming limit curves. FLC křivky udávají zásobu plasticity materiálu, jinými slovy udávají velikost deformace, které je materiál schopen dosáhnout předtím, než vznikne trhлина. Zásobu plasticity je možné vyhodnocovat pomocí různých zkoušek a metod, mezi které patří i zkouška Nakajima. Jedním z mnoha problémů při provádění zkoušek je správná příprava zkušebních vzorků, kdy norma požaduje pro přípravu vzorků použití konvenčního obrábění. Podmínky pro jejich vyhotovení uváděné normou jsou však velice přísné a jejich dodržování je časově i finančně náročné, technicky může být obtížně proveditelné.

Smyslem této práce je zjistit a vyhodnotit, do jaké míry mají tyto přísné požadavky na přípravu vzorku vliv na výsledky realizovaných zkoušek. K ověření se použijí zkušební vzorky vyrobené různými výrobními metodami. Následně se pro každou metodu přípravy vzorku stanoví křivky mezních přetvoření a vzájemně se mezi vybranými metodami přípravy vzorků porovná jejich vzájemná poloha. Tímto způsobem se bude zjišťovat míra ovlivnění výsledků zkoušek metodou přípravy vzorků.

2 Tváření a tvářitelnost

Tváření kovů je proces, při kterém dochází k deformaci materiálu působením vnějších sil, tak aby bylo dosaženo požadovaného tvaru případně změn mechanických vlastností. Při tomto procesu nedochází ke změně objemu. Principem tváření je překročení meze kluzu daného materiálu, čímž dojde k vytvoření plastické deformace. Doprovodným jevem je změna struktury materiálu, která ovlivňuje již zmíněné mechanické vlastnosti.

Tvářitelnost neboli plasticita materiálu udává jeho schopnost být tvářen a dosáhnout plastické deformace bez porušení celistvosti.

Mluvíme-li o technologické tvářitelnosti, jedná se o tvářitelnost vázanou na konkrétní tvářecí operaci nebo zkoušku tvářitelnosti. [9] [6] [13]

2.1 Faktory ovlivňující tvářitelnost

2.1.1 Metalurgické faktory

Pro kovy je charakteristická jejich krystalická struktura, která se vyznačuje pravidelným uspořádáním atomů do krystalové mřížky. Stavba této mřížky ale není dokonalá a obsahuje poruchy, které mohou být bodové, čarové, plošné a prostorové. Z hlediska tváření jsou nejdůležitější poruchy čarové, nazývané dislokace. Vznikají posunutím několika atomů skluzovým pohybem vůči sousední vrstvě. Tímto mechanismem v podstatě probíhá plastická deformace, kdy dochází k pohybu atomů kovu, čili k pohybu dislokací. Tvářitelnost je pak ovlivněna množstvím těchto poruch uvnitř mřížky. Během tváření se jejich počet zvyšuje, čímž dochází ke zpevnění kovu a nárůstu odporu proti deformaci. Nejlepší tvářitelnosti dosahují kovy, které mají krychlovou plošně středěnou mřížku. Nižší tvářitelnost mají kovy s krychlovou prostorově středěnou mřížkou a nejnižší pak šesterečnou těsně uspořádanou mřížkou.

V návaznosti na krystalovou mřížku je třeba zmínit vliv chemického složení materiálu. Kovy a zejména pak oceli obsahují doprovodné prvky, či jsou dokonce obohacovány o další prvky, kterým říkáme legovací, a které mohou významně ovlivňovat mimo jiné jejich plastické vlastnosti.

Z hlediska makrostruktury ovlivňuje tvářitelnost velikost a rovnoměrnost zrn. Čím jsou zrna kovu menší, tím lepší je jeho tažnost a tedy i tvářitelnost. Obecně lze říci, že jemnozrné materiály lze tvářet vždy lépe než materiály hrubozrné. [9]

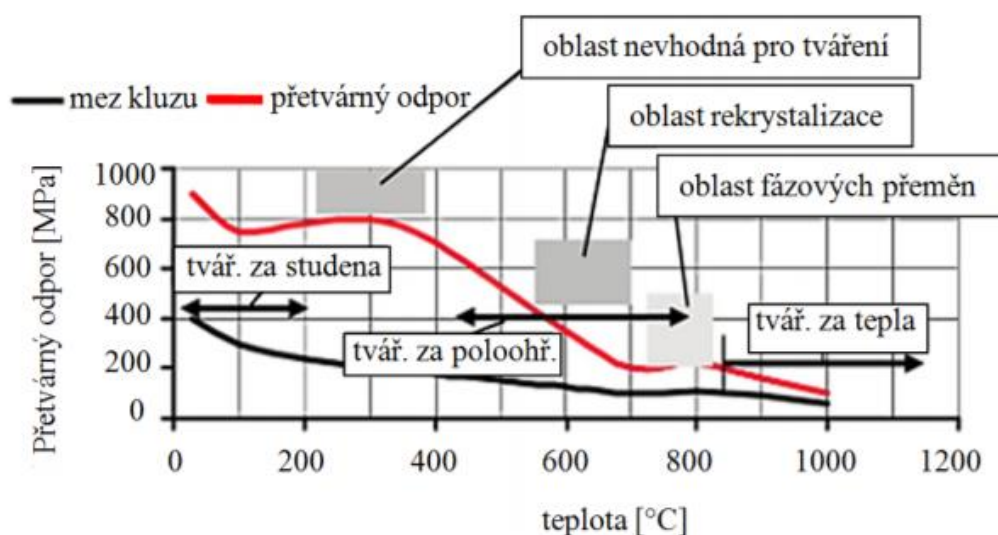
2.1.2 Mechanické faktory

Do této skupiny patří rychlost, kterou je materiál deformován. U hrubozrnných a vícefázových kovů platí, že se zvyšující se rychlostí deformace klesá jejich tvářitelnost.

Dalším faktorem, jenž má zásadní vliv na tvářitelnost, je stav napjatosti materiálu. Růst tahových složek napětí zvyšuje riziko, že dojde ke křehkému interkrystalickému lomu. [12]

2.1.3 Termomechanické faktory

Nejvýznamnějším termomechanickým faktorem ovlivňující tvářitelnost je rozmezí tvářecích teplot. Obecně platí, že čím vyšší teplota, tím lepší plastické vlastnosti. Podle teploty dělíme tvářecí procesy na tvářeni za studena a tvářeni za tepla. Hranice mezi nimi vychází z teploty rekrystalizace, která má hodnotu přibližně 0,4 z teploty tání kovu uvedené v Kelvinech.



Obr. 1 Závislost přetvárného odporu na teplotě [22]

S tvářecími teplotami souvisí vliv způsobu ohřevu materiálu. Zde je mnoho proměnných a pro každý materiál je vhodná jiná metoda ohřevu. Používají se odlišné pece, ochranné atmosféry a různé rychlosti ohřevu. [9] [13]

2.1.4 Technologické faktory

Vliv na tvářitelnost mají také samotné tvářecí stroje a nástroje. U strojů jde například o rychlost beranu, počet zdvihů za minutu či celkovou dobu tvářeni. Vliv nástrojů je dán jejich předeřevem a ohřevem na provozní teplotu, aby nedocházelo k poškození

teplotními rázy. Dále pak mazáním a druhem použitého maziva, které redukuje tření mezi nástrojem a materiálem. [12]

2.2 Určování tvářitelnosti

2.2.1 Zkouška tahem

Zkouška tahem patří mezi nejzákladnější zkoušky pro určování mechanických vlastností materiálu. Je založena na stanovování závislosti napětí na prodloužení. Jedná se zároveň o jednu z nejpoužívanějších zkoušek, neboť je jednoduchá, rychlá a vysoce průkazná. Touto zkouškou lze testovat prakticky všechny strojírenské materiály.

Vzorek s počátečním průřezem S_0 a délkou L_0 je zatěžován plynule se zvyšujícím zatížením σ , v důsledku čehož vzniká v materiálu napětí, zkoušené těleso se deformuje a obvykle dochází k jeho přetržení. Působící napětí můžeme rozdělit na napětí skutečné a napětí smluvní. Skutečné napětí σ je vztaženo na plochu aktuální, smluvní napětí σ_0 je vztaženo na počáteční průřez.

Výsledkem zkoušky bývá zpravidla graf závislosti napětí na deformaci vzorku. Z něj lze poté zjistit následující charakteristiky materiálu.

Mez pevnosti je maximální hodnota napětí, které je dosaženo před přetržením zkušebního vzorku. Charakteristickým znakem dosažení této hodnoty je vznik krčku a následné porušení materiálu. Mez pevnosti se vypočte jako podíl síly v momentě přetržení vzorku F_m ku původnímu průřezu S_0

Mez kluzu odpovídá napětí, při kterém se projevují první výrazné plastické deformace. Dochází k prodloužení vzorku, aniž by se zvětšovalo zatížení. Mez kluzu se spočítá jako podíl síly na mezi kluzu F_e ku původnímu průřezu S_0 . Je možné, aby mělo zkušební těleso buď výraznou, nebo nevýraznou mez kluzu. V případě nevýrazné meze je užívána tzv. smluvní mez kluzu (např. $R_{p0,2}$, které odpovídá 0,2 % trvalého prodloužení). Smluvní mez kluzu lze určit graficky či průtahoměry.

Tažnost je trvalá změna délky po přetržení zkušebního vzorku a rovná se poměrnému prodloužení v procentech vztažených na původní délku.

Kontrakce se také vyjadřuje v procentech, přičemž srovnává průřez S_u měřený po přetržení ku průřezu původnímu S_0 . [6] [10] [13] [30]

Z hlediska tvářitelnosti je u materiálu žádoucí co nejnižší mez kluzu, aby bylo dosaženo plastické deformace co nejdříve a co možná nejmenší silou.

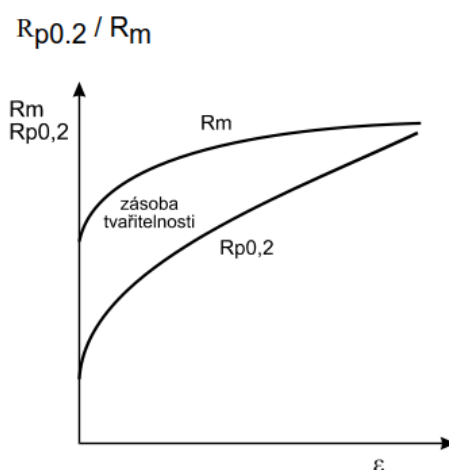
Dalším důležitým faktorem je podíl meze kluzu a meze pevnosti. V tomto případě je potřeba, aby již zmíněný podíl byl co nejmenší. V praxi se dosahuje následujících hodnot:

$R_p / R_m = 0,55 - 0,65$ materiál vykazuje vynikající tvářitelnost

$R_p / R_m = 0,65 - 0,80$ tvářitelnost materiálu je nižší

$R_p / R_m > 0,80$ tyto materiály lze jen tvářet jen velice omezeně či vůbec [12]

Rozdíl mezi mezí pevnosti a mezí kluzu udává, kdy se materiál začne plasticky deformovat a kdy dojde ke vzniku trhlin a tím pádem k porušení jeho celistvosti. Tento rozdíl se nazývá zásobou plasticity.



Obr. 2 Poměr $R_{p0,2} / R_m$ jako ukazatele tvářitelnosti [23]

Pro vyhodnocování tvářitelnosti se také používá tažnost materiálu. Platí, že čím vyšší tažnost, tím lepší tvářitelnost. Posuzuje se však pouze homogenní tažnost. Ta je charakterizována jako prodloužení zkušebního vzorku na mezi pevnosti. [23]

2.2.2 Součinitel plastické anizotropie

Jako anizotropní se označují materiály, jejichž vlastnosti jsou závislé na směru, ve kterém danou vlastnost měříme. [10]

Součinitel plastické anizotropie je definován následujícím vztahem:

$$\text{Součinitel plastické anizotropie: } r_\alpha = \frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_s} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{s_0}{s_k}} = \frac{\ln \frac{b_0}{b_k}}{\ln \frac{l_k b_k}{l_0 b_0}}$$

Kde: r_α je směrová hodnota r

b je šířka vzorku

s je tloušťka vzorku

Této problematice se ve větší míře věnuje norma ČSN ISO 10113. [27]

2.2.3 Exponent deformačního zpevnění

Při tváření ocelí i ostatních kovů dochází ke zvyšování jejich pevnostních charakteristik. Během nárůstu velikosti deformace se zvyšuje kluzové napětí, při kterém nastává plastická deformace. Tento proces charakterizuje exponent zpevnění. Čím vyšší je hodnota exponentu, tím je křivka závislosti napětí na deformaci strmější. Z toho také vyplývá, že deformace při maximálním zatížení roste s rostoucí hodnotou exponentu. Zvětšuje se i rozdíl mezi mezí pevnosti a mezí kluzu.

Podle hodnoty exponentu deformačního zpevnění dělíme materiály následovně:

- $n \leq 0,215$ materiály mají špatnou tvářitelnost
- $n = (0,215; 0,25>$ materiály mají dobrou tvářitelnost
- $n > 0,25$ materiály mají vynikající tvářitelnost [10]

Exponentu deformačního zpevnění se věnuje norma ČSN ISO 10275. [28]

2.2.4 Další zkoušky

- **Pěchovací zkouška**

Pomocí této zkoušky se vyhodnocuje přetvárný odpor materiálu a jeho mechanické a tvárné vlastnosti. Jde o destrukční zkoušku, při které dochází k nevratnému porušení testovaného vzorku. Zkušební vzorky vyrobené z kovů mají tvar válečku, jehož výška bývá 1,5 – 2,5 násobkem jeho průměru. Vzorky z jiných materiálů mívají tvar krychle. Během zkoušky je vzorek namáhán na tlak, čímž dochází ke zmenšování jeho výšky. Na boční strany vzorku zatížení nepůsobí, což má za následek zvětšování příčného průřezu zkušebního tělesa. Toto zvětšení má za následek vyboulení bočních stran a označuje se jako soudečkovitost. Zkouška je ukončena v momentě, kdy dojde ke vzniku první povrchové trhliny. Dalším možným ukončením je například stlačení vzorku na předem danou výšku. Při tomto způsobu je posuzováno, zda vzorek zatížení vydržel a je tak vhodný pro použití při tvářecích procesech. Z důvodu závislosti mechanických vlastností materiálu na jeho teplotě se zkoušky mohou provádět za studena, tepla nebo poloohřevu. [7]

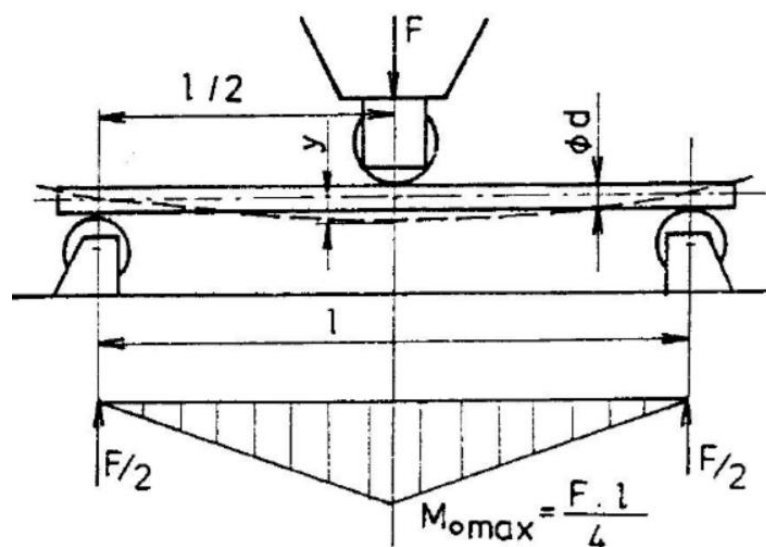
- **Zkouška ohybem**

Smyslem ohybové zkoušky, která se řadí mezi statické destruktivní, je stanovit průhyb y_{\max} určitého materiálu. Zkouška ohybem probíhá tak, že na zkušební kus položený na podporách působí ohybová síla, která působí deformaci až do porušení materiálu. Zejména se tato zkouška používá u materiálů křehkých, u kterých dochází k lomu, ale i u materiálů tvárných. U tvárných materiálů se jedná o technologickou zkoušku,

při které jsou zjišťovány charakteristiky materiálu při ohybu. Následně je možné využít dolisování ohnutých konců, v důsledku čehož dojde ke zvětšení napětí v materiálu a tím i ke zvětšení poloměru ohybu.

Zvláštním způsobem ohybové zkoušky je provedení zkoušky se vzorky s vruby. Vruby mohou být různě tvarované a jsou způsobily významně ovlivňovat výsledné hodnoty z důvodu narušení celistvosti materiálu, což mění průběh napětí ve vzorku.

Základními veličinami u ohybové zkoušky jsou pevnost v ohybu a maximální ohybový model, ze kterých lze následně vypočítat samotný průhyb a natočení. Pevností v ohybu se rozumí napětí, které je materiál schopný vydržet. [30]



Obr. 3 Schéma zkoušky ohybem [24]

- **Zkouška krutem**

Podstata zkoušky spočívá v pevném upnutí jednoho konce analyzovaného vzorku a zatěžováním druhého konce krouticím momentem o určité velikosti. Konec zkoušky nastává v momentě, kdy dojde ke vzniku trhliny způsobené překročením maximálního napětí v krutu. Obvykle se používají vzorky kruhových průřezů, ale lze testovat i jiné typy vzorků. Výsledkem zkoušky je určení úhlu zkroucení za působení určitého krouticího momentu. Další zjišťované veličiny jsou maximální napětí v krutu a poměrné zkroucení. Maximální napětí v krutu je podíl maximálního zatěžujícího momentu $M_{k,max}$ a průřezové charakteristiky W_k v krutu. Zkouška v krutu nepatří k nejvyužívanějším zkouškám, využívá se však při simulaci zatížení hřídelí. [30]

2.3 Technologické zkoušky

Technologické zkoušky svým průběhem napodobují vlastní výrobní operace a doplňují tak informace získané základními zkouškami. Zároveň slouží k určení způsobu, jakým se bude materiál při daném výrobním procesu chovat.

Cíle technologických zkoušek:

Určení velikosti tvářecích sil a deformační práce.

Určení velikosti a průběhu zatížení tvářecího nástroje.

Stanovení vhodných typů, tvarů a rozměrů polotovarů.

Stanovení kritických podmínek přetvoření při vyčerpání plasticity [6]

2.3.1 Zkouška hlubokotažnosti dle Erichsena

Tato zkouška patří mezi základní technologické zkoušky tenkých plechů. Slouží k určování použitelnosti různých tříd plechů při hlubokém tažení. Provádí se tak, že zkušební vzorek je upnut mezi tažnici a přidržovač.

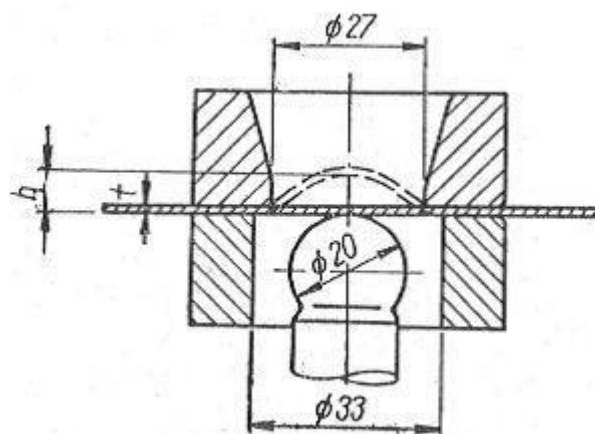
Následně se do upnutého plechu vtlačuje tažník. Ten má tvar polokoule o průměru 20 mm a je vyroben z oceli. Tažník se pohybuje konstantní rychlostí a deformuje plech.

Pohyb nástroje je v dnešní době zajištěn nejčastěji hydraulicky pomocí zkušebních strojů. Zkouška je ukončena v momentě, kdy na vrchlíku vznikne první trhlinka. Předmětem vyhodnocení je

maximální hloubka vniknutí tažníku do zkušebního vzorku. Tato naměřená hodnota se označuje IE a její velikost závisí na rychlosti, kterou zkouška probíhá. Provedení zkoušky je velice jednoduché, rychlé a zkušební vzorky nejsou náročné na přípravu.

V současnosti se zkouška doplňuje o moderní snímací přístroje, které zachycují celý průběh zkoušky a dokážou vyhodnotit průběh deformace a vzniku trhliny v čase. [6] [7]

Zkoušku popisuje norma ČSN EN ISO 20482. [29]



Obr. 4 Schéma zkoušky hlubokotažnosti dle Erichsena [25]

2.3.2 Zkouška kalíškovací

Podobně jako předchozí zkouška je i tato určena pro posouzení vhodnosti plechů pro hluboké tažení. Principem je vytažení kalíšku tažníkem za použití přídržovače, aby nedošlo ke zkroucení taženého plechu. Zkušební vzorek, označovaný jako rondel, má tvar kružnice a v průběhu zkoušky se zvětšuje jeho průměr až do takové velikosti, kdy už nebude možné vytáhnout kalíšek bez vzniku trhlin. Jelikož známe průměr tažníku $d_v = 50$ mm, můžeme určit velikost minimálního součinitele tažení m_{min} a stupeň tažení K ze vztahu:

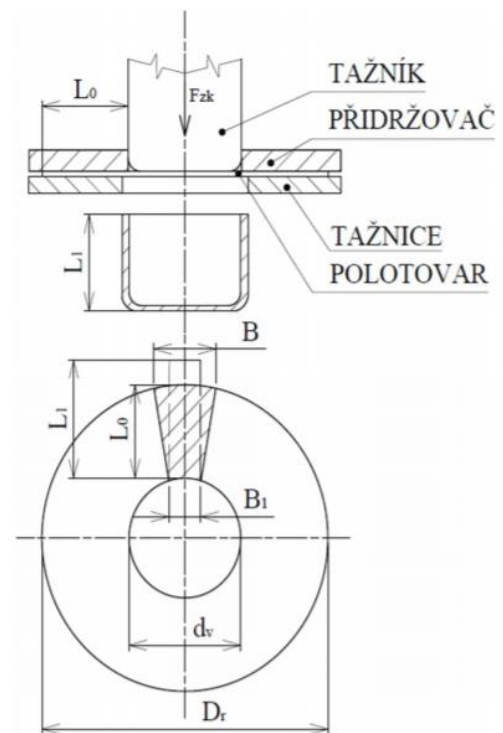
$$\text{Minimální součinitel tažení: } m_{min} = \frac{d_v}{D_r} = \frac{1}{K} [-]$$

Kde: d_v – průměr tažníku [mm]

D_r – průměr rondele [mm]

K – stupeň tažení [-]

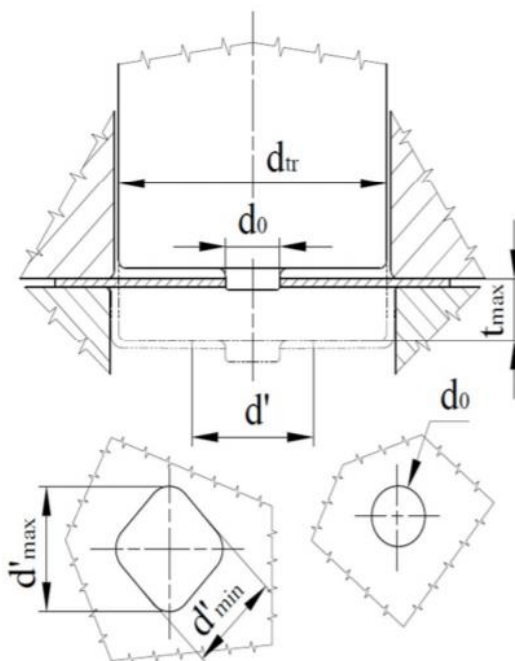
Tato zkouška velice přesně napodobuje reálný technologický proces a lze pomocí ní vyhodnotit anizotropii zkoušeného plechu, protože na výtažku dojde ke vzniku takzvané „cípatosti“. Nevýhodou zkoušky je náročnější příprava vzorků kvůli zvětšujícímu se poloměru. [6] [7]



Obr. 5 Schéma kalíškovací zkoušky [6]

2.3.3 Zkouška rozšiřováním otvoru

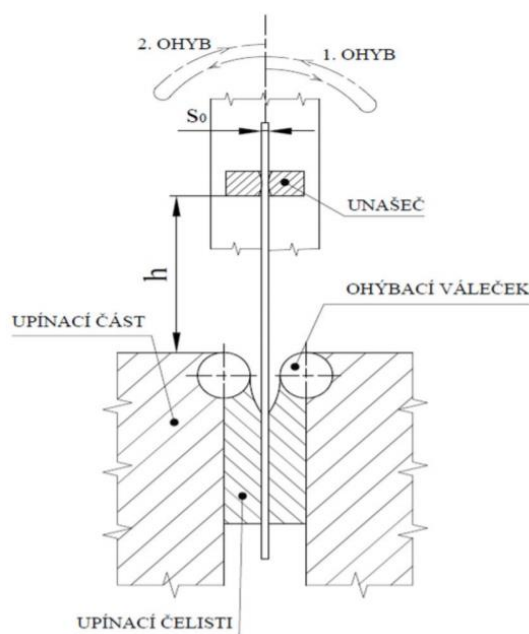
Stejně jako u předchozí zkoušky je i tato založena na vytažení kalíškové součásti ze zkušebního vzorku za použití přídržovače. Zkoušený vzorek má tvar čtverce a v jeho středu je kruhový otvor, jehož průměr je oproti průměru tažníku třetinový. Tažením vzorku dochází ke zvětšení hloubky a zároveň k deformaci otvoru. Tažník má v tomto případě rovné čelo a může či nemusí být opatřen středícím výstupkem. Zkouška probíhá až do doby, kdy na okrajích díry vzniknou první praskliny. Následně se vyhodnocují hodnoty jako maximální hloubka vniku tažníku a velikost deformace původního průměru otvoru. [6] [7] [8]



Obr. 6 Schéma zkoušky rozšiřováním otvoru [6]

2.3.4 Zkouška střídavým ohýbáním

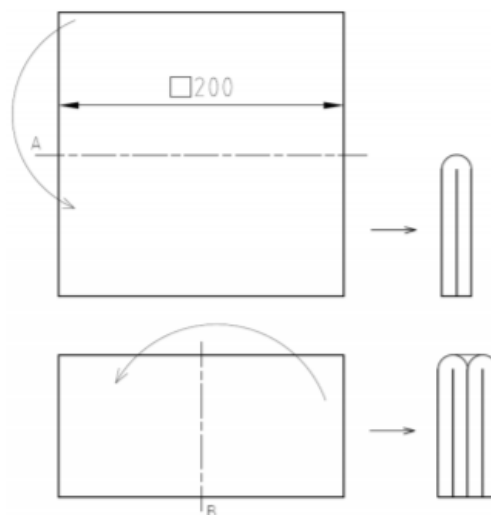
Jak už název napovídá, během zkoušky dochází k periodickému namáhání vzorku ohybem až do vzniku lomu. Zkušební těleso má obvykle šířku 20 mm, délku 100 mm a tloušťku dle zkoušeného plechu. Toto těleso se jedním koncem upne do upínacích čelistí, druhým koncem pak do unašeče připevněného k pohyblivé páce. Vzdálenost čelistí a unašeče se volí podle tloušťky plechu a poloměru, přes který dochází k ohybu. Dále dochází k plynulému ohýbání rychlostí až 60 ohybů za minutu okolo ohýbacích válečků daného průměru. Úhel každého z ohybů je 90°. Zkouška končí v momentě dosažení meze únavy materiálu, což má za následek jeho porušení. [6]



Obr. 7 Schéma zkoušky střídavým ohýbáním [6]

2.3.5 Zkouška dvojitým ohybem

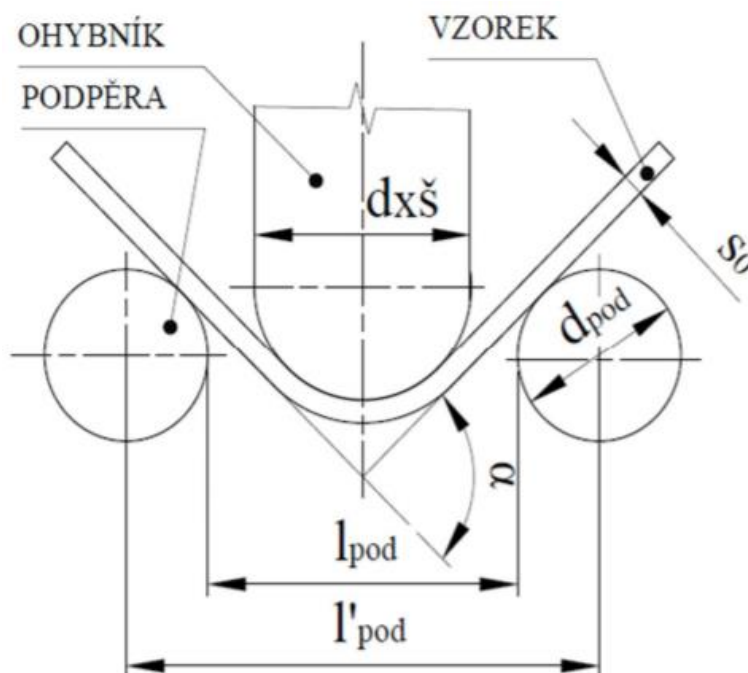
U zkoušky dvojitým ohybem se používají zkušební vzorky tvaru čtverce o délce strany 200 mm. V prvním kroku dochází k ohybu vzorku o 180° okolo osy A a potom stejným způsobem kolem osy B. Následně se posuzuje, zda v ohýbaných místech vznikly trhliny. Tato zkouška je velmi jednoduchá a nevyžaduje speciální zkušební stroje. [6]



Obr. 8 Schéma zkoušky dvojitým ohybem [6]

2.3.6 Zkouška lámavosti

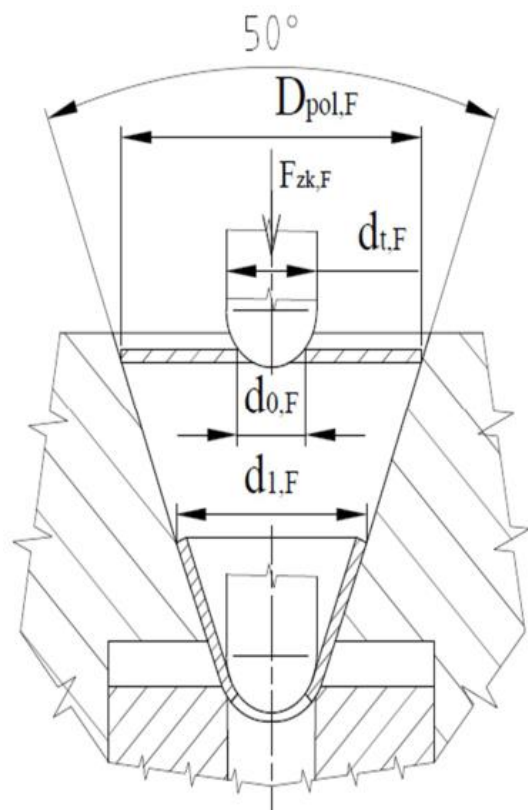
Tato zkouška se používá pro tlusté plechy nebo taktéž u svarů. Zkušební vzorek je umístěn na podpěry a je zatěžován ohybníkem ve svém středu. Ohýbání probíhá až do vzniku trhliny v místě ohybu. Zkušební vzorky bývají 200 až 400 mm dlouhé a 25 až 50 mm široké a při jejich odebrání z tabule plechu se musí vzít v potaz směr válcování plechu. K provedení této zkoušky stačí přípravek jednoduché konstrukce a konvenční lisovací stroje. Cílem zkoušky je stanovení maximálního úhlu ohybu, který nevykazuje vznik trhlín na povrchu materiálu. [6] [7]



Obr. 9 Schéma zkoušky lámavosti [6]

2.3.7 Zkouška tažením v kuželové tažnici

Někdy také Fukuiho zkouška spočívá v tažení zkušebního přístřihu v kuželovité tažnici. Používá se plochý, kulovitý, eliptický či parabolický tažník. Zkušební vzorek má tvar kruhu a může či nemusí být opatřen středovým otvorem. Vzorek má průměr $D = (50 - 70)a_0$, kde a_0 je tloušťka plechu. Průměry tažníku se pohybují v rozmezí od 12,7 mm pro $a_0 = 0,5 - 0,8$ mm až do 26,99 mm pro $a_0 = 1,2 - 1,6$ mm. Vyhodnocuje se hloubka, které tažník dosáhl v okamžiku vzniku trhliny. Výhodou zkoušky je namáhání vzorku komplexním schématem napjatosti. Na obvodu probíhají deformace typické pro vypínání a u tažníku se polotovar deformuje jako při hlubokém tažení. [6] [7] [8]



Obr. 10 Schéma Fukuiho zkoušky [7]

Pro hodnocení tvářitelnosti se při této zkoušce používá následující vzorec:

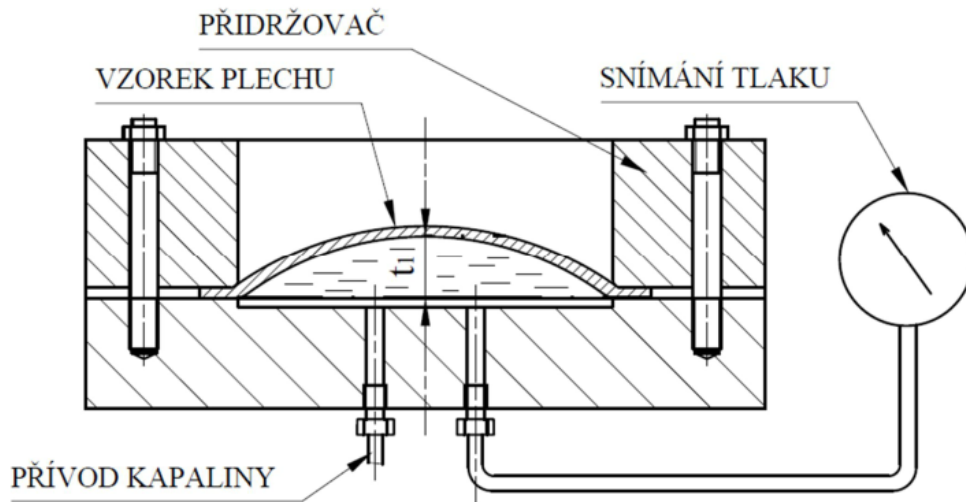
$$\text{Hodnocení tvářitelnosti: } J = \frac{D_{\text{kužele por.}}}{D_0}$$

Kde $D_{\text{kužele por.}}$ je průměr obvodu výtažku v momentě vzniku trhliny a D_0 je počáteční průměr vzorku.

2.3.8 Zkouška hydraulická (Tomlenova zkouška)

Stejně jako výše popsané zkoušky je i ta hydraulická založena na vyboulení plechového přístřihu. Rozdíl spočívá v samotném tažení, neboť místo tažníku se zkušební vzorek deformuje tlakem kapaliny. Zkouška začíná založením plechu do zkušebního zařízení. Následuje utažení přidržovače, ten drží plech na místě a zároveň utěšňuje celou soustavu. Poté se do dutiny pod plechem začne přivádět kapalina a rostoucí tlak způsobí vyboulení plechu. Zkouška končí, když se objeví první trhlinka. Vyhodnocuje se velikost vyboulení zkušební vzorku v momentě vzniku praskliny. Dále se hodnotí tvar praskliny a také stav deformovaného povrchu plechu.

Nevýhodou Tomlenovy zkoušky je konstrukčně složitější zkušební zařízení, avšak provedení samotné zkoušky je velice rychlé a jednoduché. Velkou předností je, že kapalina působí rovnoměrně na celý povrch plechu a není zde třeba brát ohled na tření, které vzniká mezi tažníkem a výtazkem u jiných zkoušek. [6]



Obr. 11 Schéma Tomlenovy zkoušky [6]

2.3.9 Zkouška Nakajima

Vzhledem k povaze práce a použití metody Nakajima při provádění vlastního experimentu bude zkouška popsána v samostatné kapitole.

3 Materiály pro výrobu karoserie

V dnešní době se pro výrobu automobilových karoserií využívá více druhů materiálů. Nejvíce využívaným materiálem je ocel. Ta tvoří u některých karoserií 80 – 90 % celé konstrukce. Z důvodu snižování hmotnosti roste podíl využití hliníku, hořčíku a jejich slitin. Využívají se také modernější materiály, jakými jsou kovové pěny, kompozity či plasty. Vzhledem k povaze této práce se zaměřím na popis vybraných druhů ocelí používaných pro stavbu karoserie automobilu.

Ocelový skelet automobilu musí vyhovovat nejrůznějším předpisům, z toho důvodu jsou i na samotné materiály kladeny určité požadavky. Prvním posuzovaným kritériem pro volbu vhodné oceli jsou její mechanické vlastnosti, zejména pevnost, tuhost, pružnost a houževnatost. Mechanické vlastnosti jsou velice důležité pro bezpečnost automobilu při nárazu, jelikož na nich závisí schopnost materiálu pohlcovat deformační energii.

Soudobým trendem je snaha o co nejmenší spotřebu pohonných hmot a s tím spojenou produkci emisí, s čímž souvisí požadavek na snižování hmotnosti automobilů. Je kladen důraz na výběr vhodných materiálů, které spojují dostatečné mechanické vlastnosti s co nejnižší hmotností. Zmíněné kombinace požadavků je možné dosáhnout například použitím menšího množství materiálu o vyšší pevnosti.

Dále je třeba brát zřetel na vhodnost dané oceli pro všechny výrobní technologie, které jsou pro stavbu karoserie používány. Posuzuje se mimo jiné její tvářitelnost, svařitelnost, tepelné zpracování a možnost provedení povrchových úprav. Neméně důležitá je i životnost materiálu, jeho odolnost vůči korozi a recyklovatelnost.

Jako poslední zmíním aspekt, který je v dnešní době velice důležitý. Je jím cena materiálu a náklady na jeho zpracování, což se ve značné míře promítá do výrobních nákladů. [1] [2]

3.1 Oceli pro hluboké tažení

Tyto oceli jsou schopny vydržet bez porušení velké deformace. Mají dobrou tvářitelnost, vysokou zásobu plasticity a mohou dosahovat vysokého stupně přetvoření. Používají se na výrobu tvarově složitějších součástí, jakými jsou například panely dveří.

Oceli pro hluboké tažení charakterizuje norma EN 10027 - 1. (Systém a označování ocelí – Část 1: Stavba značek ocelí.) Jedná se o oceli označované podle jejich použití a mechanických nebo fyzikálních vlastností, které začínají písmenem D. Tato skupina materiálů je použita v experimentální části práce. [3]

3.2 Oceli bez volných intersticiálů

Obsahují velmi malé množství intersticiálních atomů uhlíku a dusíku. Toho se dosahuje technologií vakuového odplynění. Dále se oceli legují titanem či niobem. Legující prvky tvoří karbidy a nitridy, čímž napomáhají redukovat množství intersticiálů ve struktuře oceli a tím dochází ke zlepšování hodnoty normálové anizotropie. Obsah legur musí být velice přesný, jelikož při jejich nadbytku může docházet ke snížení hodnoty normálové anizotropie. [3]

3.3 Bake hardening oceli

Tato třída označuje speciální nízkouhlíkové oceli, které využívají zrychleného procesu stárnutí při zvýšené teplotě, takzvaný bake hardening efekt. Oceli musí obsahovat malé množství vodíku, ten po hlubokém tažení vyplní vzniklé dislokace. Následuje nanesení laku a jeho vypálení při teplotě 170°C po dobu 20 min. Tímto dojde k urychlenému stárnutí, čímž se zvýší mez kluzu o 30 – 90 MPa. Když se zvýší mez kluzu přibližně o 40 MPa, lze ztenčit plech o 0,1 mm a jeho odolnost proti promáčknutí zůstane zachována. [3] [4]

3.4 Mikrolegované HSLA oceli

Označení HSLA nesou mikrolegované vysokopevné oceli, které se vyrábějí pomocí precipitace a zjemňováním zrna. Legujícími prvky jsou titan, vanad a niob. Mají vysokou únavovou pevnost, torzní tuhost a jsou odolné vůči rázům. Další výhodou ocelí je jejich zaručená svařitelnost. Spojení jemné struktury a malého množství legur oceli dává vysokou pevnost spolu s dobrou houževnatostí. Plechy vyráběné z těchto ocelí jsou díky malému množství legujících prvků poměrně levné a mají dobré mechanické vlastnosti. Aplikují se například na součástky podvozku nebo systému zavěšení kol, případně mohou sloužit jako výztuhy pro části nevyžadující maximální pevnosti. [3] [4]

3.5 Vysoko – pevnostní oceli (AHSS)

Jde o pokročilé oceli, jejichž mechanické vlastnosti převyšují konvenční oceli. Vyznačují se kvalitním zpracováním a mají vysokou mez pevnosti 700 – 1600 MPa, ale na úkor nižší tažnosti. Jejich vlastnosti umožňují snížení hmotnosti celé karosérie. Používají se na výrobu B – sloupků nebo prahů dveří.

Do této skupiny patří nízkouhlíkové oceli označované písmeny DP, ty mají vysokou pevnost a vyrábí se z nich výztuhy předního nárazníku. Dále jsou zde zahrnuty komplexně

fázové oceli (CP), jejichž předností je vysoká schopnost absorbovat deformační energii, proto se používají například pro výrobu výztuh dveří. Dalším zástupcem jsou martenzitické oceli (MS) s vysokou pevností a v porovnání s DP nebo CP mají lepší tvárnost. Své uplatnění nacházejí při výrobě bočních výztuh a rámu. Feriticko – bainitické oceli (FB) poskytují dobrou odolnost vůči únavě a proti účinkům rázů. Hodí se pro výrobu různých profilů konstrukce. Oceli označované jako TRIP se vyznačují velice dobrou tažností a také schopností pohlcovat deformační energii. Mohou být použity na výztuhy B – sloupků, ale především se používají jako deformační výztuha střech. TWIP oceli jsou charakteristické značnou mírou deformačního zpevnění, vysokou mezí pevnosti se zachování poměrně vysoké tažnosti. [3] [4] [5]

3.6 Ultra vysoko – pevnostní oceli (UHSS)

Vycházejí z AHSS. Jedná se o skupinu nejpevnějších a nejtvrdějších ocelí používaných v automobilovém průmyslu. Jejich znakem je vysoká mez kluzu a mez pevnosti. Vyrábí se z nich výztuhy dveří, sloupků a předního nárazníku. Zvyšují ochranu posádky uvnitř automobilu. [3]

3.7 Materiál použitý v experimentální části práce

Měření byla provedena na materiálové jakosti DC06 ZE50/50BPO, jehož vlastnosti jsou popsány v normě ČSN EN 10152. Jde o ušlechtilou, legovanou ocel s nízkým obsahem uhlíku a feritickou strukturou. Dále je v oceli obsaženo malé množství titanu, který reaguje s intersticiálně rozpuštěným uhlíkem a dusíkem za vzniku karbonitridů a snižuje tak jejich obsah, což vede ke zvýšení hodnot normálové anizotropie a zlepšení vlastností pro hluboké tažení.

Jmenovitá tloušťka plechu je 0,75 mm. Povrchovou úpravou je elektrolyticky nanesená vrstva zinku o tloušťce 5 μm . Plech se dodává ve svitcích a je fosfátován a olejován. [19] [20] [21]

Vlastnosti materiálu dle ČSN EN 10152:

Tabulka 1 Chemické složení materiálu DC ZE50/50BPO [20]

Chemické složení materiálu DC06 ZE50/50 BPO				
Hodnoty jsou uvedeny v maximálním hmotnostním zastoupení [%]				
C	P	S	Mn	Ti
0,020	0,020	0,020	0,250	0,30

Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu DC06 ZE50/50 BPO [20]

Mechanické vlastnosti materiálu DC06 ZE50/50 BPO				
R_e	R_m	A₈₀	\bar{r}	\bar{n}
[N·mm ⁻²]	[N·mm ⁻²]	[%]	[-]	[-]
120 ÷ 190	270 ÷ 350	min. 37	min. 1,8	min. 0,200

4 Křivky mezní tvářitelnosti

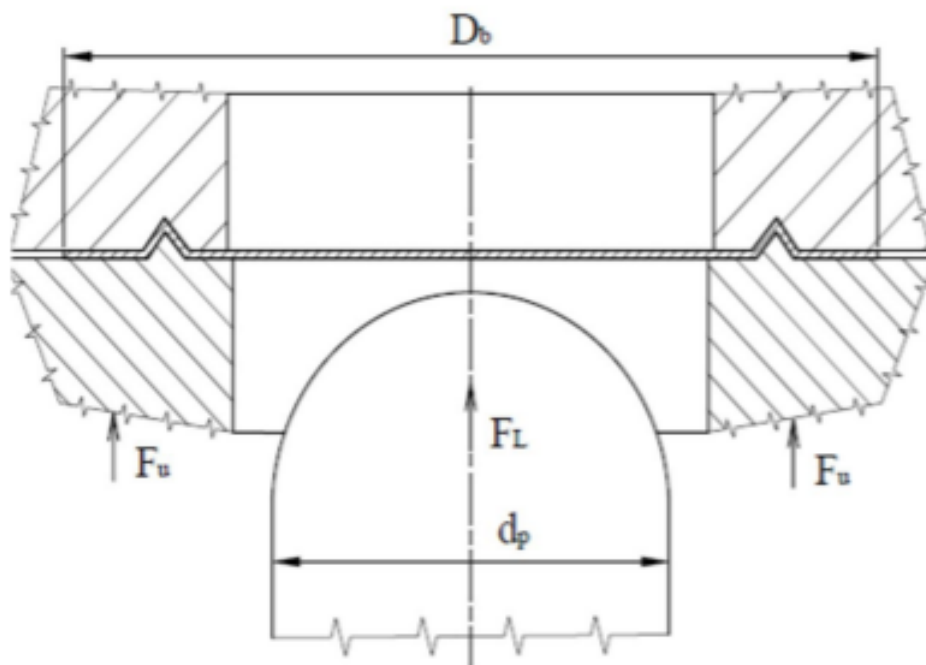
4.1 Metody vyhodnocování zásoby plasticity

Existují různé metody pro vyhodnocování zásoby plasticity. Jedná se například o vyhodnocení podle mikrotvrlosti nebo exponentu deformačního zpevnění. Dalšími používanými jsou metody podle Tomlenova, Keelera a Goodwina nebo vyhodnocení pomocí čárové sítě metodou Moire.

V experimentální části je pro určení mezních křivek použita metoda dle Keelera a Goodwina, proto je popsána podrobněji v následující kapitole. [12]

4.2 Princip zkoušení dle Nakajima

Principem zkoušky je tažení zkušební vzorku předepsaného tvaru polokulovitým tažníkem s daným průměrem 100 ± 2 mm. Tažený vzorek je upnut pomocí přidržovače, který brání vtahování plechu. Zkouška končí v okamžiku vzniku trhliny. Aby byla zkouška platná, musí trhlina vzniknout v oblasti ve vzdálenosti maximálně 15 % průměru tažníku od vrcholu polokulové hlavice tažníku.



Obr. 12 Schéma zkoušky Nakajima [8]

Výsledkem zkoušky je:

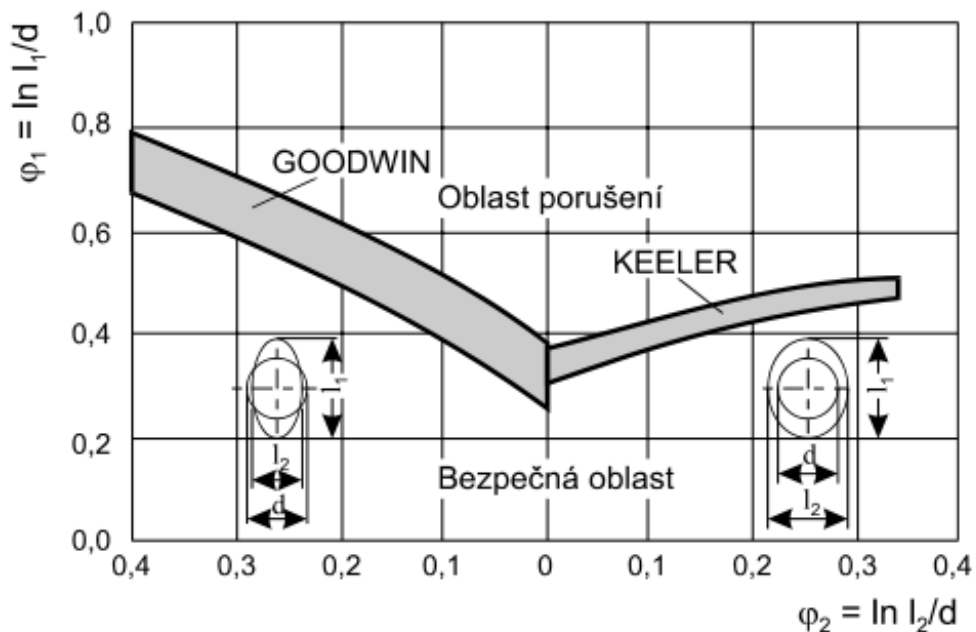
- maximální hloubka h_L , při které dojde ke vzniku trhliny
- mezní lomová křivka
- bod v diagramu mezní tvářitelnosti, při testování více vzorků různých tvarů se získá více bodů a je možné sestavit celý diagram

Zkoušku lze také využít k určení Keeler – Goodwinova diagramu. Toho se docílí provedením zkoušky s několika vzorky odlišných tvarů předepsaných normou ČSN EN ISO 12004 – 2. Každý ze vzorků odpovídá příslušnému bodu diagramu. Z naměřených hodnot je možné aproximací získat křivku mezní tvářitelnosti a sestavit diagram mezních přetvoření. [8] [11]

Pomocí zkoušky Nakajima se budou testovat vzorky v praktické části mé bakalářské práce.

4.3 Keeler – Goodwinův diagram

Pro správné navržení tvářecího procesu je důležité znát zásobu plasticity daného materiálu. Z tohoto důvodu se materiály podrobují zkouškám, jejichž výstupem jsou diagramy mezní tvářitelnosti také označovány jako Keeler – Goodwinovy diagramy.

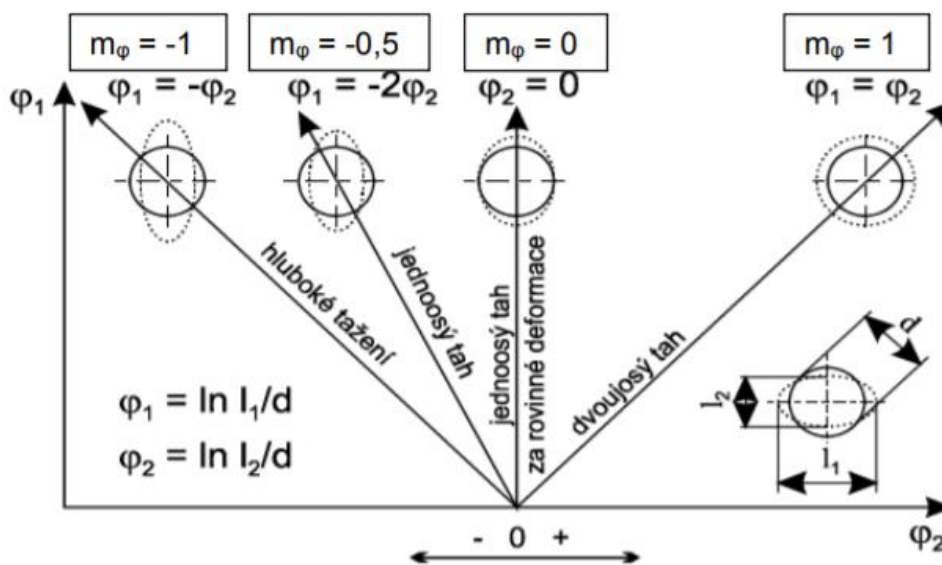


Obr. 13 Keeler - Goodwinův diagram [23]

Diagram zobrazuje závislost skutečné deformace ϕ_1 (svislá osa) a na ní kolmé skutečné deformace ϕ_2 (vodorovná osa, nabývá kladných i záporných hodnot). Šedé oblasti pak určují kritické hodnoty přetvoření a označují se jako křivky mezních přetvoření. Právě

zde dochází ke ztenčování tloušťky plechu a vzniku lokálního krčku. Překročení kritické hodnoty vede k porušení integrity materiálu a vzniku trhliny. Naopak pod touto hodnotou se nachází takzvaná bezpečná oblast, kdy lze materiál bezpečně tvářet, aniž by došlo ke vzniku krčku či trhliny.

Určování hodnot φ vychází z deformace jednotlivých bodů deformační sítě, která se vytvoří na vzorku před provedením zkoušky. Za předpokladu, že výchozím elementem měrné sítě je kruh o průměru d , pak se velikost deformace určí z velikosti deformovaného elementu sítě. Největší poloosa (hlavní) tohoto zdeformovaného elementu prezentuje deformaci φ_1 , nejmenší poloosa (vedlejší, kolmo na hlavní) prezentuje deformaci φ_2 . Velikosti deformace jsou pak zlogaritmované podíly délky příslušné poloosy a původního průměru elementu sítě. Z obrázku (Obr. 14) je patrné, že k deformaci může docházet různými způsoby, proto jsou různé poměry mezi hlavní a vedlejší deformací. To je způsobeno různými stavy napjatosti.



Obr. 14 Typy deformací pro různé tvářecí operace [23]

Z obrázku (Obr. 14) je patrné, že při deformaci výchozího elementu mohou nastat tyto případy:

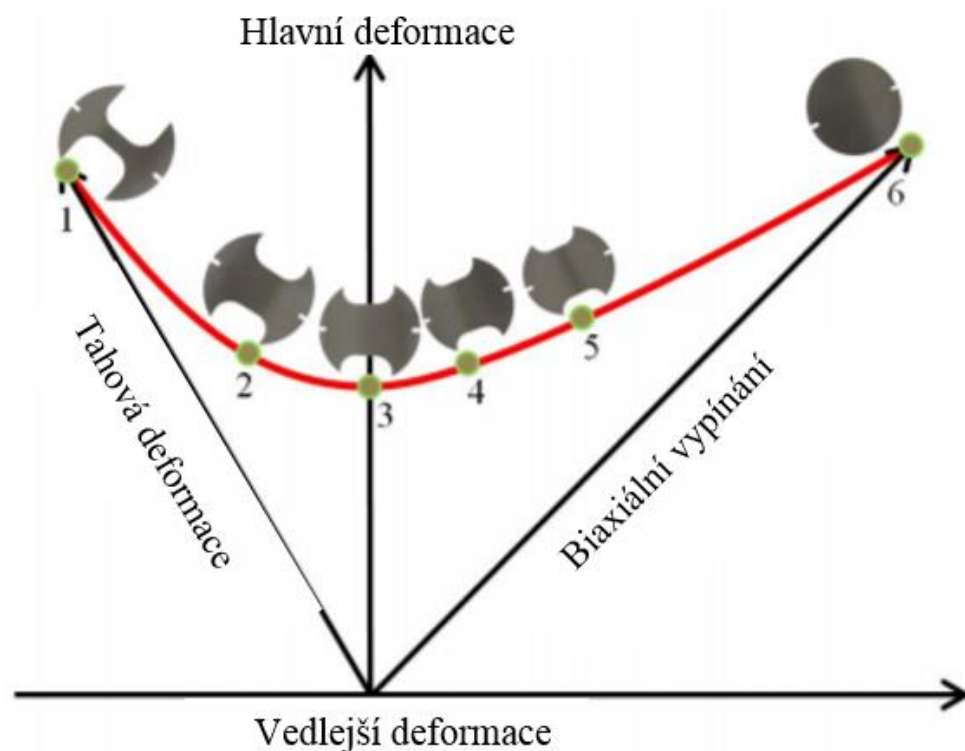
- kladná deformace v obou směrech
- kladná deformace v hlavním směru, ve vedlejším směru k deformaci nedochází
- kladná deformace v hlavním směru, ve vedlejším směru je deformace záporná

Pro značení těchto způsobů deformace se zavádí ukazatel stavu přetvoření m_φ , který je dán následujícím vztahem a nabývá hodnot $m_\varphi \in \langle -1, 1 \rangle$.

Ukazatel stavu přetvoření: $m_\varphi = \frac{\varphi_2}{\varphi_1}$

Zásoba plasticity materiálu při konkrétním stavu deformace (odpovídajícím příslušné tvářecí operaci) se stanovuje na základě délky úsečky mezi výchozím bodem (deformace odpovídá velikosti 0) a bodem, ve kterém došlo ke vzniku trhliny při provádění zkoušky.

K tomu, aby se při zkoušce docílilo požadovaného způsobu deformace, se používají vzorky různých tvarů (viz Obr. 15). Tvar těchto zkušebních vzorků je předepsán normou ČSN EN ISO 12004 – 2.



Obr. 15 Geometrie zkušebních vzorků odpovídající určité deformaci [26]

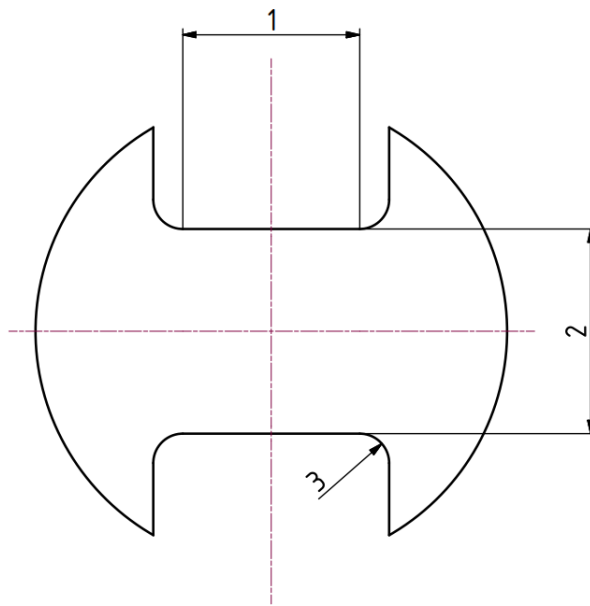
Polohu křivek mezních přetvoření určují zejména mechanické vlastnosti a chemické složení materiálu, dále pak jeho jakost, metalurgické a tepelné zpracování. Dalším faktorem je exponent deformačního zpevnění, jehož rostoucí hodnota má za následek zvyšování skutečné deformace φ_1 . Na hodnotu skutečné deformace φ_2 má největší vliv koeficient plošné anizotropie.

Keeler – Goodwinův diagram v praxi umožňuje:

- posoudit, jestli dojde ke vzniku trhliny, pokud u výtažku známe hodnoty deformací φ_1 a φ_2 v jeho kritických bodech
- s předchozím bodem souvisí posouzení technologické bezpečnosti, které se provádí srovnáním skutečné deformace v kritických bodech výtažku s hodnotami mezních přetvoření z diagramu
- určení celkové zásoby plasticity materiálu a její postupné rozložení do dílčích kroků tvářecích operací [6] [15] [16]

4.4 Tvar zkušebních těles

Způsob přípravy vzorků popisuje norma ČSN EN ISO 12004 – 2. Tloušťka zkušební vzorku se musí pohybovat mezi 0,3 mm a 4 mm. Geometrie je zobrazena na obrázku:



Obr. 16 Tvar zkušební vzorku [11]

Kde: 1 je délka dříku

2 je zbývající šířka výstřižku

3 je zaoblení = $R = 20$ mm až 30 mm

Norma doporučuje, aby byl středový rovnoběžný dřík delší než 25 % průměru tažníku. Pro tažník průměru $D = 100$ mm se běžně používají délky dříku 25 mm až 50 mm a poloměr zaoblení 20 mm až 30 mm. Pro tažník o průměru 100 mm je výchozí průměr přístříhu 200 mm.

K popsání kompletní křivky mezní tvářitelnosti je třeba minimálně pěti různých geometrií. Je doporučeno volit geometrie tak, aby se docílilo rovnoměrného rozmístění bodů potřebných k určení křivky mezní tvářitelnosti. Dvojosého stavu deformace se dosahuje pomocí kruhového vzorku bez vybrání. U dalších vzorků se vybrání postupně zvětšuje, čímž se zmenšuje rozměr označený číslem 2 a poslední vzorek s největším vybráním vykazuje stav jednoosé tahové deformace. Pro každou geometrii je zapotřebí nejméně tři platných vzorků. Při vlastním experimentu této práce bylo použito sedmi různých geometrií pro detailnější popsání FLD křivky.

Norma také jasně předepisuje způsob, kterým má být vzorek odebrán z tabule plechu. Jsou povoleny způsoby, jimiž se zajistí, že vznik trhlin nebude iniciován hranami zkušebních vzorků. Důležité je také, aby nedošlo ke zpevňování nebo ovlivnění mikrostruktury. Lze tedy použít frézování, jiskrové obrábění či jiné metody, které na okrajích vzorků nevytvoří mikrotrhliny nebo neovlivní strukturu materiálu. [11]

4.5 Vyhodnocování deformace

4.5.1 Systém ARAMIS

ARAMIS je označení pro bezkontaktní měřicí systém, který vyrábí německá společnost GOM, GmbH. ARAMIS k měření využívá soustavy dvou kamer umístěných na společném ramenu, což mu umožňuje provádět prostorovou analýzu reálných deformací. Systém je možné využít pro statické i dynamické děje a lze takto jednoduše získat 3D data povrchu, objemu a deformací zkoumaného vzorku, aniž by bylo třeba velkého množství jiných měřících přístrojů, jako jsou tenzometry, extenzometry a jiné. Řízení kamer, osvětlení, záznam analogových dat a nastavení měřících sekvencí zajišťuje integrovaná řídicí jednotka. Zpracování dat pomocí počítače pak umožňuje software, který je součástí systému ARAMIS. [14] [17] [18]



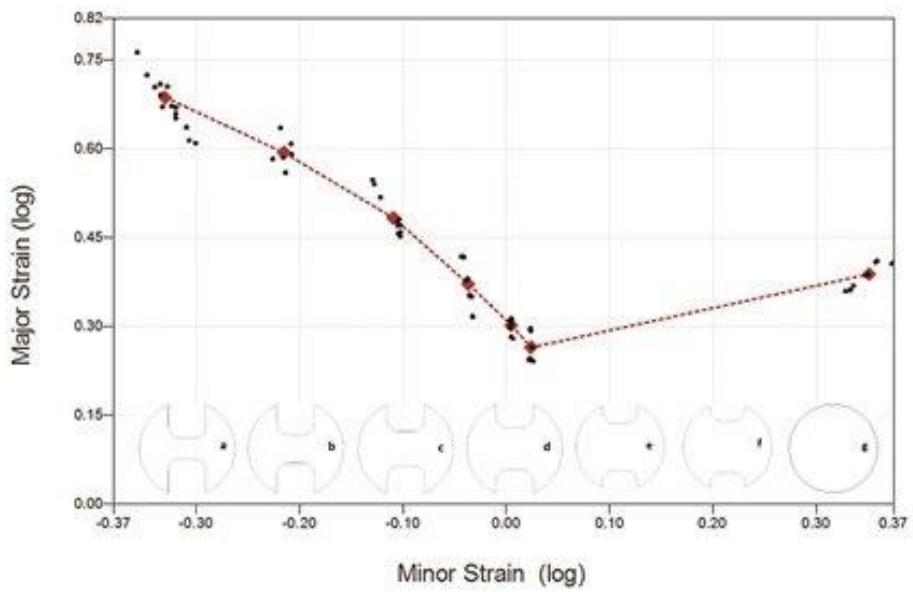
Obr. 17 Kamery s osvětlením jako součást systému ARAMIS od firmy GOM [18]

4.5.2 Princip měření

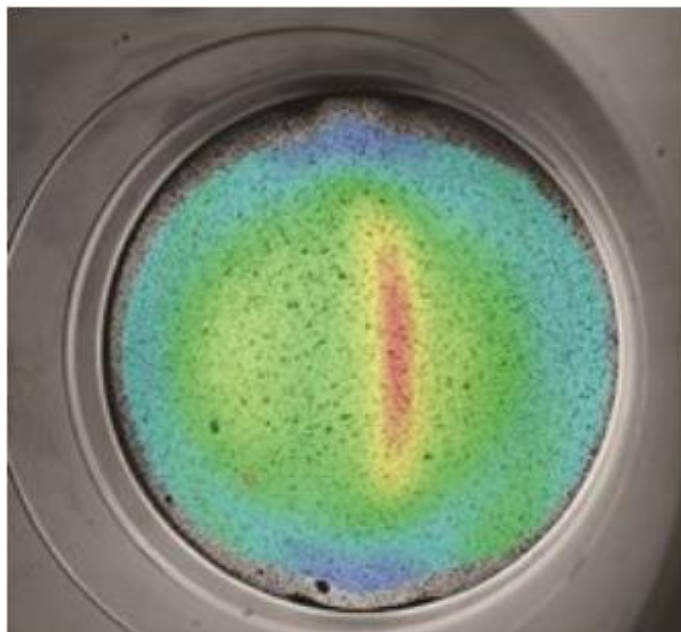
Systém ARAMIS ke své funkci potřebuje stochastickou síť bodů, na které při probíhající deformaci sleduje změnu polohy jednotlivých bodů vůči sobě a také změnu jejich výchozí polohy. Norma doporučuje nanášet síť rozprašováním barvy na zkušební vzorky. Je dobré použít podkladovou vrstvu matné barvy, aby se snížily odlesky světla. Je třeba volit barvy s vysokým kontrastem. Nejčastěji se jako základní barva volí bílá a na ní se nastříká oblak černých skvrn. Vzorky se musí před barvením dobře odmastit kvůli co nejlepší přilnavosti nátěru k povrchu.

Program si potom sledovanou oblast rozkouskuje na jednotlivé sektory. Obraz rozdělí na pixely a v každém pixelu spočítá poměr černé a bílé barvy, dojde tak k vytvoření takzvaných stupňů šedi. Díky tomu, že je síť tvořená náhodně rozmístěnými body, je každý sektor pevně definován určitým vzorem. Po deformaci systém opět vyhledá stejné sektory pomocí stupňů šedi a vyhodnotí změnu jejich polohy. [14] [17] [18]

Ukázka možných výstupů po provedení zkoušky snímané systémem ARAMIS:



Obr. 18 FLC křivka jako výstup měření [14]



Obr. 19 Prostorově znázorněná deformace na dílu po provedené zkoušce Nakajima [14]

5 Návrh experimentu

Pro zkoušky používané ke stanovení FLC křivek je normou ČSN EN ISO 12004 – 2 předepsán způsob odebrání zkušebního vzorku z tabule plechu. Jak již bylo zmíněno, musí být použito metod, které neovlivní vlastnosti zkušebního vzorku či neovlivní její mikrostrukturu. Doporučené jsou metody konvenčního obrábění, například frézování, avšak vzhledem k malé tloušťce plechů používaných například v automobilovém průmyslu je výroba vzorků tímto způsobem velice náročná. Takto tenké plechy mají při frézování tendenci se zbortit z důvodu ztráty stability. Je tedy nezbytné volit malý úběr materiálu a pomalý posuv frézy, čímž se značně prodlužuje čas výroby a tím pádem i její nákladnost. Proto se někdy přistupuje ke způsobům, které přípravu vzorků podstatně zjednodušují, ale jsou v rozporu s normou. Některé podniky pro své účely nemusejí brát normou stanovené předpisy v potaz a pro rychlejší určení vlastností plechu připravují vzorky jinými způsoby. Konkrétně se může jednat o vystřížení v tvarovém nástroji, dělení pomocí elektroerozivního obrábění či vyřezání vzorků laserem. Avšak tyto způsoby mohou ovlivnit hranu vzorku, což může zkreslit výsledky zkoušky.

Cílem experimentu je vyrobit sady vzorků různými metodami, čímž bude možné sledovat vliv použité metody na výsledky zkoušky. Pro každý způsob přípravy vzorku se stanoví pomocí zkoušky Nakajima křivka mezních přetvoření a tyto křivky se mezi sebou porovnají. Podle získaných výsledků se určí, do jaké míry mohou zvolené metody přípravy vzorků ovlivňovat výslednou polohu FLC křivek.

5.1 Tvar zkušebních vzorků

Pro účely této práce jsem se rozhodl, že není potřeba dodržet přesný tvar zkušebních vzorků, který je dán normou. Cílem experimentu není přesné stanovení FLC křivek pro různě vyrobené vzorky, nýbrž porovnání do jaké míry se budou tyto FLC křivky podle způsobu přípravy vzorků vzájemně lišit. Tvar vzorků je tedy navržen tak, aby vybranými metodami byla jeho příprava snadná a ovlivnění hrany způsobené danou metodou přípravy se projevilo v co největší míře.

Příloha 1 zobrazuje tvar použitých vzorků a slouží jako výrobní dokumentace.

5.2 Způsob přípravy zkušebních vzorků

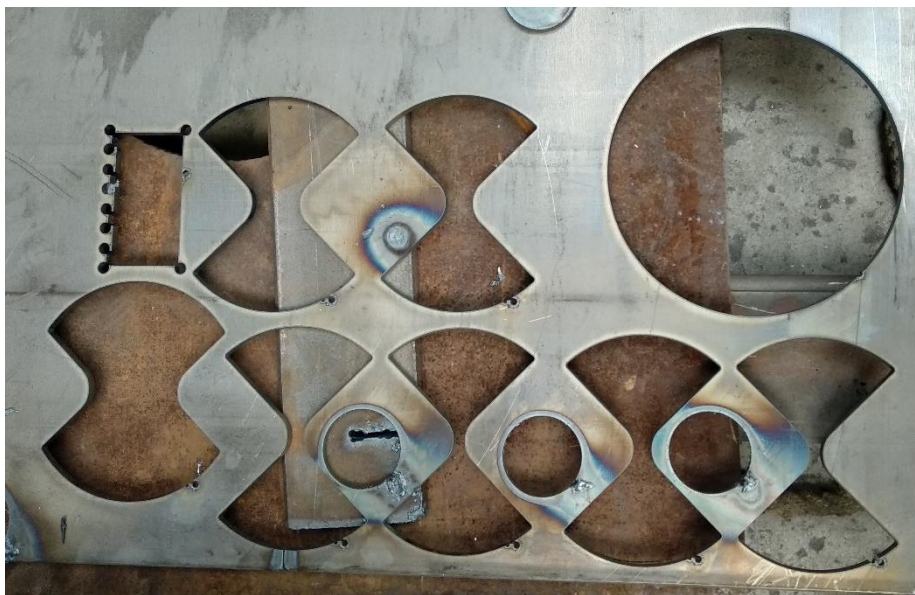
Jak již bylo zmíněno, tloušťka analyzovaných materiálů pro použití v automobilovém průmyslu je obvykle menší než 1 mm. Jako další možné metody přípravy

vzorků se kromě frézování jeví použitelnými řezání vodním paprskem, laserem, elektroerozivní obrábění, apod.

Pro účely experimentu jsem z hlediska dostupnosti zvolil řezání laserem, ruční zabroušení hrany pomocí pilníku a vrtáním pomocí vykružovacího vrtáku.

Jedna sada vzorků byla dle stanoveného tvaru (kap. 5.1) připravena řezáním pomocí laseru. Dále byla připravena sada vzorků pomocí laseru, která byla opatřena přídavkem pro následné odebrání ručním broušením. Ruční broušení bylo prováděno pro dosažení přesného rozměru tak, že byly pro každý tvar vzorku připraveny šablony, které byly pro broušení použity. Broušením byla odstraněna laserem ovlivněná hrana, zároveň se jedná o jemnou metodu úběru materiálu, takže se eliminuje riziko vzniku mikrotrhlin, které by mohly iniciovat vznik praskliny v průběhu zkoušky.

Výkresy vzorků s přídavkem jsou v příloze 2.



Obr. 20 Vyříznutí šablon [zdroj vlastní]

Poslední zvolenou metodou pro přípravu zkušebních vzorků bylo vrtání pomocí vykružovacího vrtáku. Polotovar byl připraven pomocí laseru (kruhový přístřih průměru 200 mm) a vrtáním a následným odštížením zbylého materiálu byl dosažen požadovaný tvar. Při přípravě vzorku touto metodou jsem narážel na nedostatečnou tuhost výchozího polotovaru, což mělo vliv na malou přesnost dosaženého tvaru.

Pro účely práce byly zvažovány i další metody přípravy zkušebních vzorků, avšak se je z časových důvodů nepodařilo dotáhnout do konce.

Doplňující obrázky jsou v přílohách 3 a 4.



Obr. 21 Ukázka pracoviště pro vykružování [zdroj vlastní]

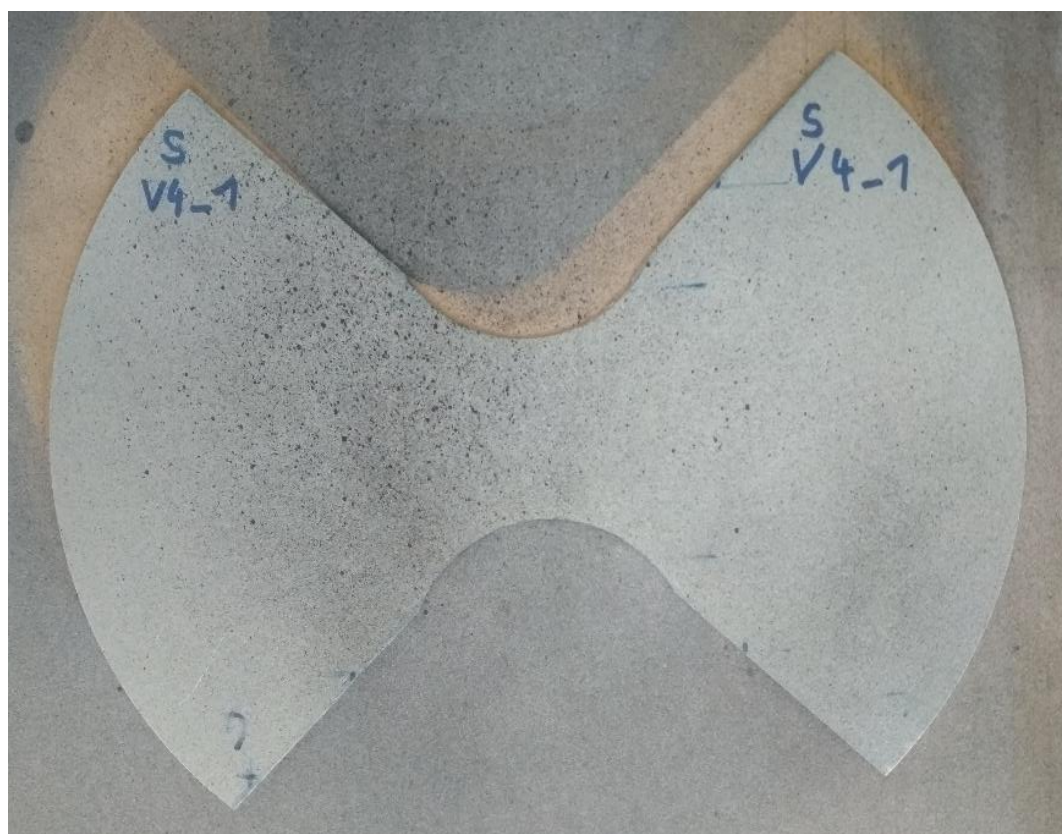
5.3 Vytvoření stochastické sítě bodů

Norma ČSN EN ISO 12004 – 2 popisuje nanášení stochastické sítě takto: „Stochastické (tečkované) obrazce mohou být nanášeny rozprašováním nátěru na povrchy zkušebních těles. Po deformaci se doporučuje zkontrolovat přilnavost nátěru k povrchu. Je možné rozprášíť tenkou matnou bílou základní vrstvou, aby se snížily zpětné odrazy od povrchů zkušebních těles. Potom může být nastříkán oblak nahodile rozmístěných černých skvrn (např. černým nátěrem ve spreji nebo grafitem).“ [11]

Při provádění experimentu byla síť bodů vytvořena v souladu s doporučeními, která jsou uvedena v normě. Nejprve jsem zkušební vzorky odmastil směsí toluenu a dalších organických rozpouštědel a následně byla pomocí bílé, matové barvy ve spreji nanášena podkladová vrstva. V dalším kroku se černou barvou ve spreji nastříkala měrná síť ve tvaru drobných, nepravidelně rozmístěných teček, čímž došlo k vytvoření kontrastní stochastické měrné sítě.



Obr. 22 Použité barvy a chemikálie k odmaštění [zdroj vlastní]

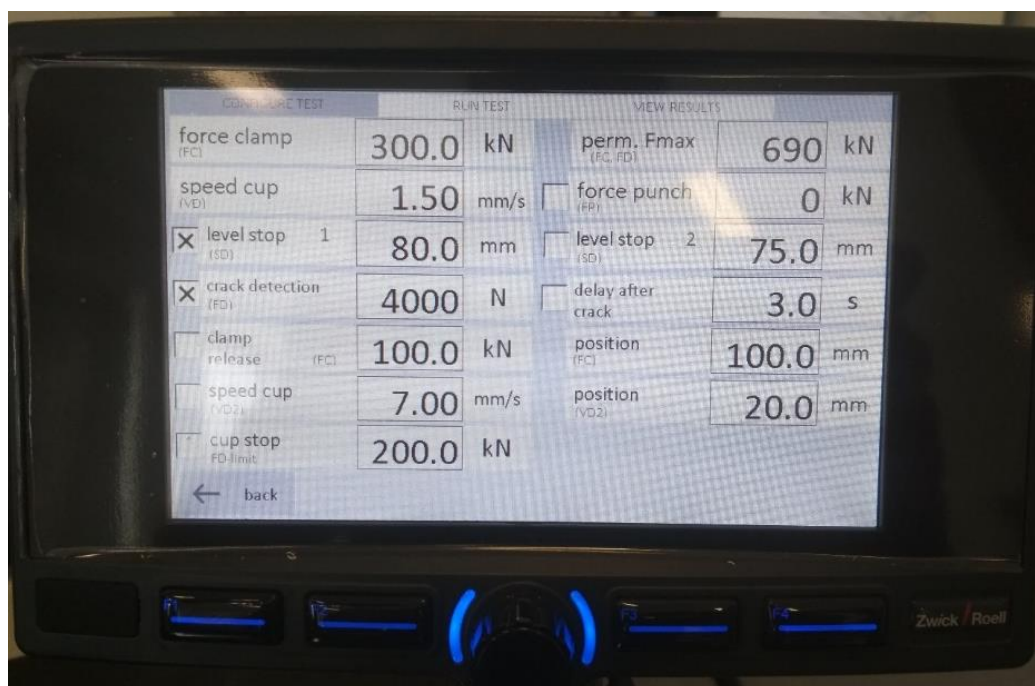


Obr. 23 Detail stochastické sítě [zdroj vlastní]

5.4 Podmínky zkoušení

Podmínky, za kterých má zkoušení vzorků probíhat, jsou opět předepsány normou ČSN EN ISO 12004 – 2. Rychlost tažníku je stanovena na $1,5 \pm 0,5$ mm/s. Dále musí být nastavena taková přidržovací síla výstřižku, aby se zabránilo vtažení materiálu. Zkušební teplota je určena na 23 ± 5 °C. [11]

Následující obrázek (Obr. 24) zobrazuje nastavení průběhu zkoušky na kontrolním panelu zkušebního zařízení.



Obr. 24 Kontrolní panel s parametry zkoušky [zdroj vlastní]

Z obrázku je patrné, že přidržovací síla je nastavena na 300 kN, tato síla je dostatečná k zabránění vtažení materiálu. Rychlost tažníku 1,5 mm/ s odpovídá normě. Zkouška je přerušena v momentě, kdy zatěžovací síla náhle poklesne pod hranici 4000 N, což definuje vznik trhliny. Ostatní údaje z displeje nejsou pro parametry zkoušky relevantní. Teplota v místnosti se měřila samostatným teploměrem a ve dnech měření se pohybovala mezi 25 až 28 °C.

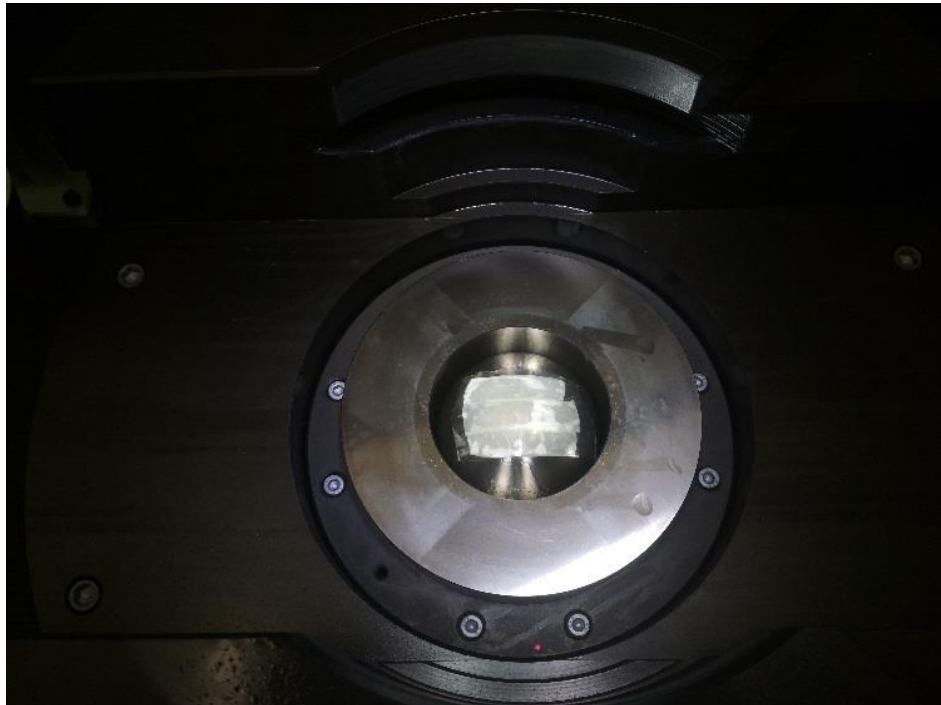
5.5 Průběh zkoušky

Zkoušky se prováděly na zkušebním zařízení BUP 600, které dokáže vyvinout maximální zatěžovací sílu 600 kN. [31]

Provedení zkoušky se skládá z následujících kroků:

1. Nanesení kluzné vrstvy na tažník

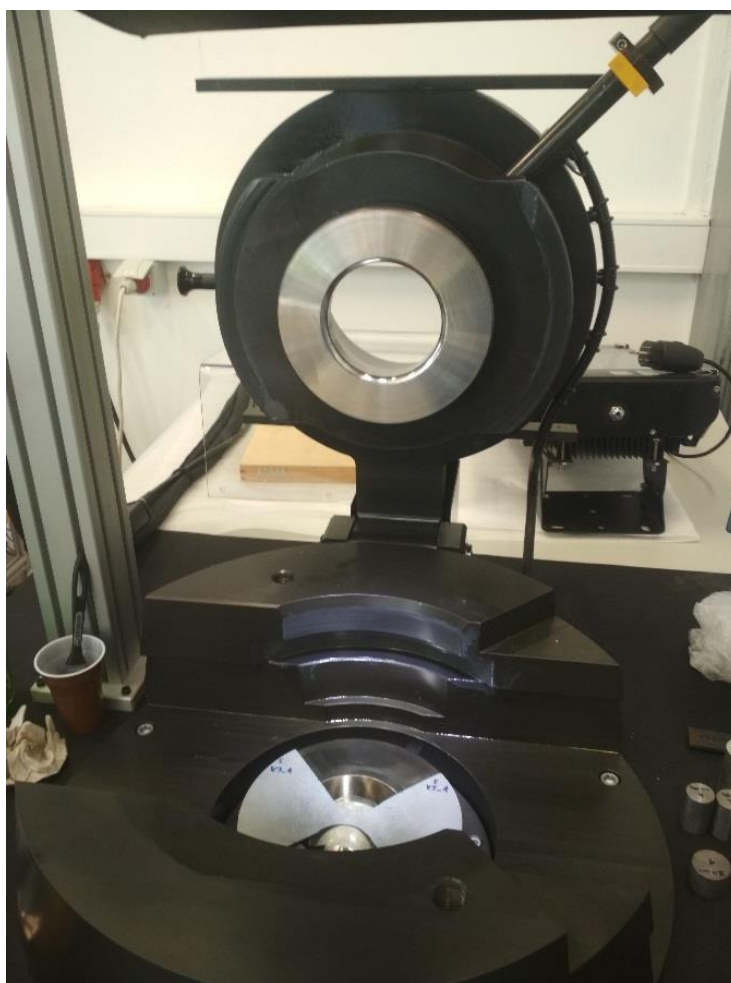
Tímto dojde ke snížení tření mezi tažníkem a materiálem, což je nezbytné pro vznik trhliny na vrcholu analyzovaného vzorku, jak je požadováno normou. V tomto případě je použita kombinace jemného oleje na čelisti, PTFE folie a polyethylenové folie, přičemž pořadí nanášení je olej, PTFE folie, olej, PE folie a další vrstva oleje. Těchto pět vrstev tření sníží na dostatečnou úroveň.



Obr. 25 Nanesená kluzná vrstva na tažníku [zdroj vlastní]

2. Založení vzorku do zkušební komory

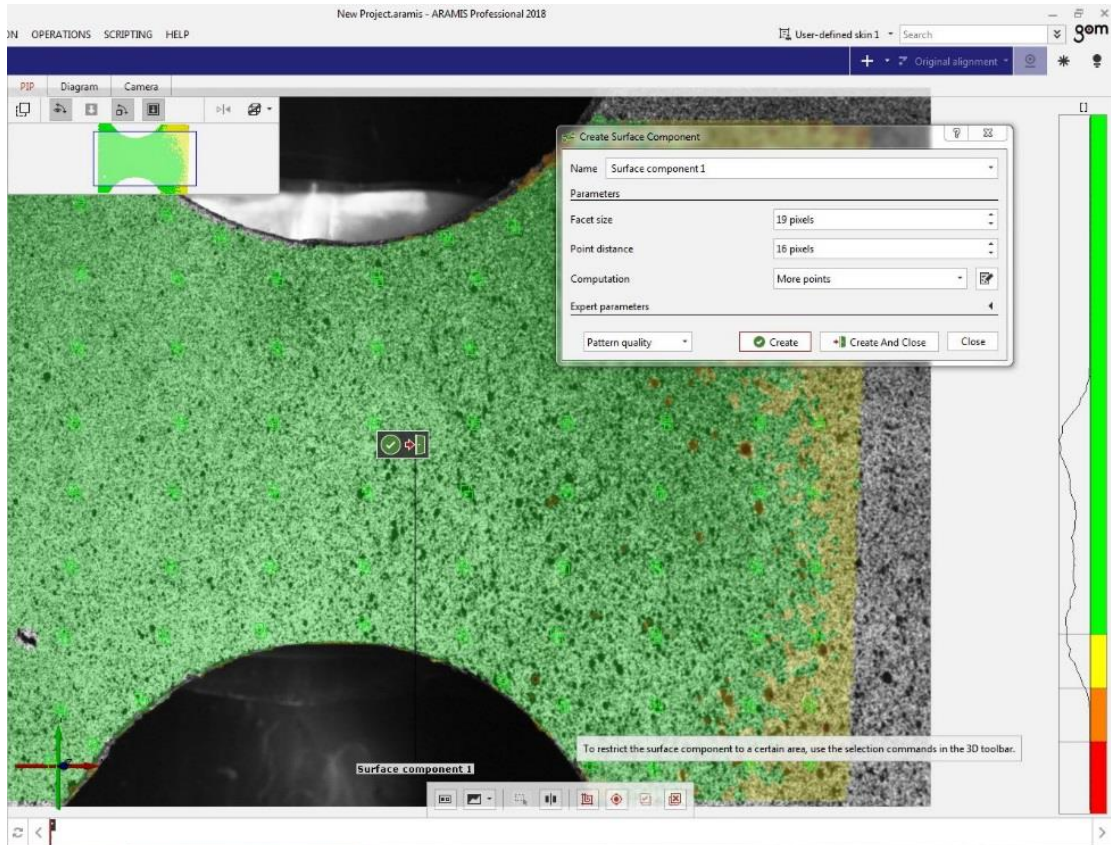
Následně je vzorek založen do zkušebního stroje, jak je patrné z obrázku (Obr. 26).



Obr. 26 Vzorek umístěný ve zkušební komoře [zdroj vlastní]

3. Kontrola nanesené sítě pomocí kamer

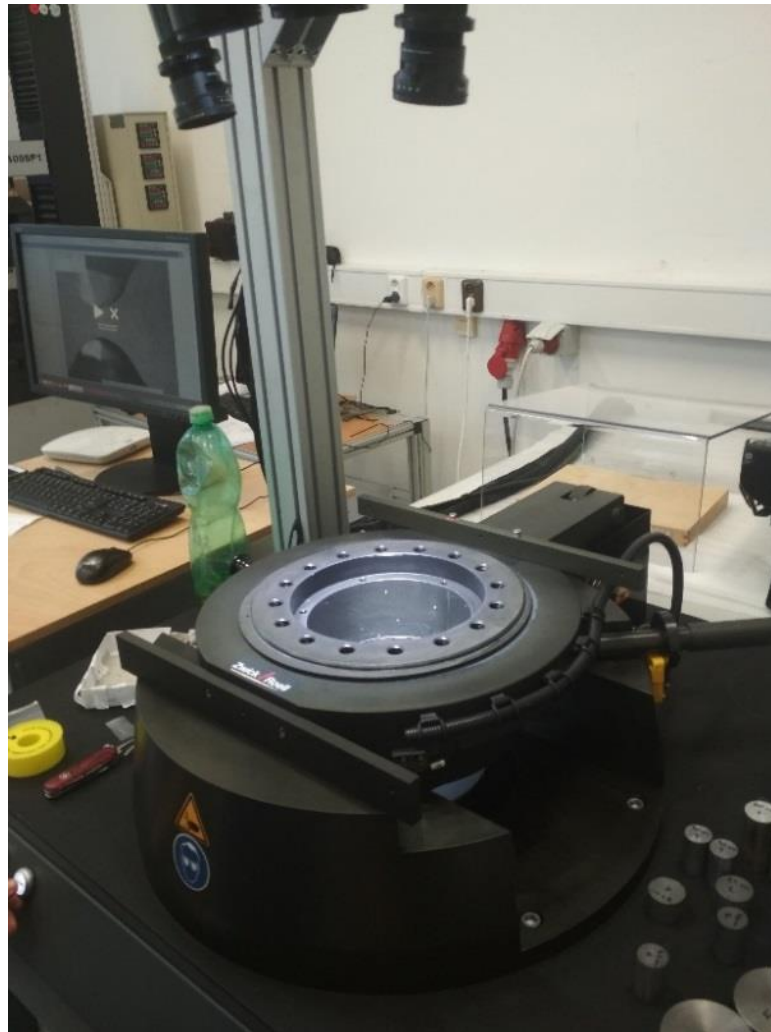
Pomocí kamer systému ARAMIS je nasnímán povrch zkušebního tělesa a vyhodnocena kvalita vytvořené měrné sítě. Zelená barva značí dobrou kvalitu provedení sítě, jak je možné vidět na obrázku (Obr. 27).



Obr. 27 Vyhodnocení kvality sítě před zkouškou [zdroj vlastní]

4. Zavření zkušební komory

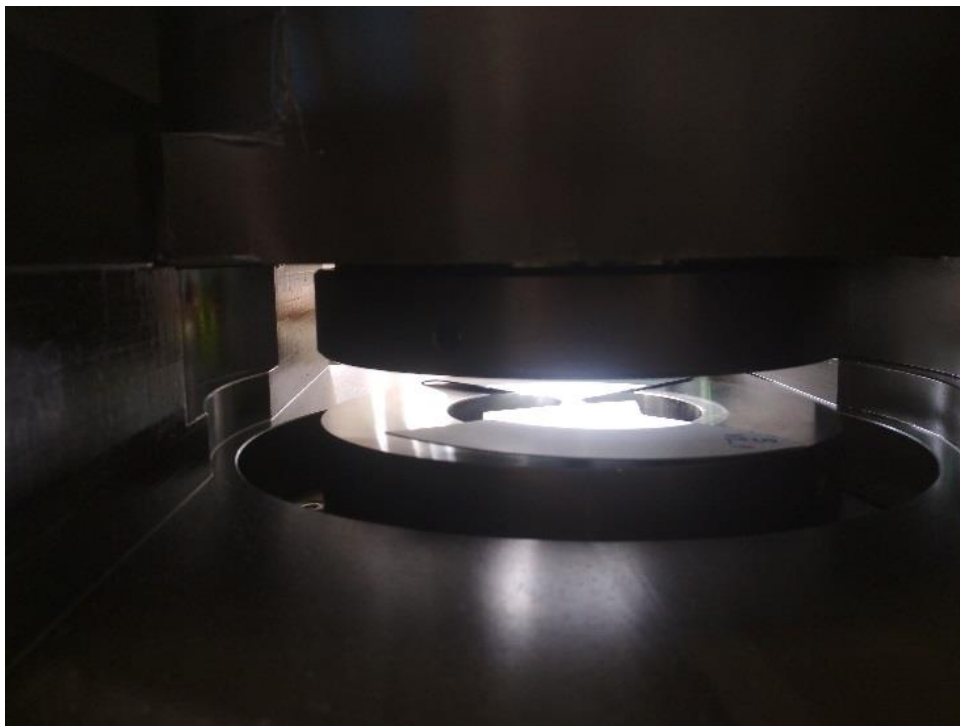
Následně je uzavřen pracovní prostor, jak je patrné z následujícího obrázku (Obr. 28)



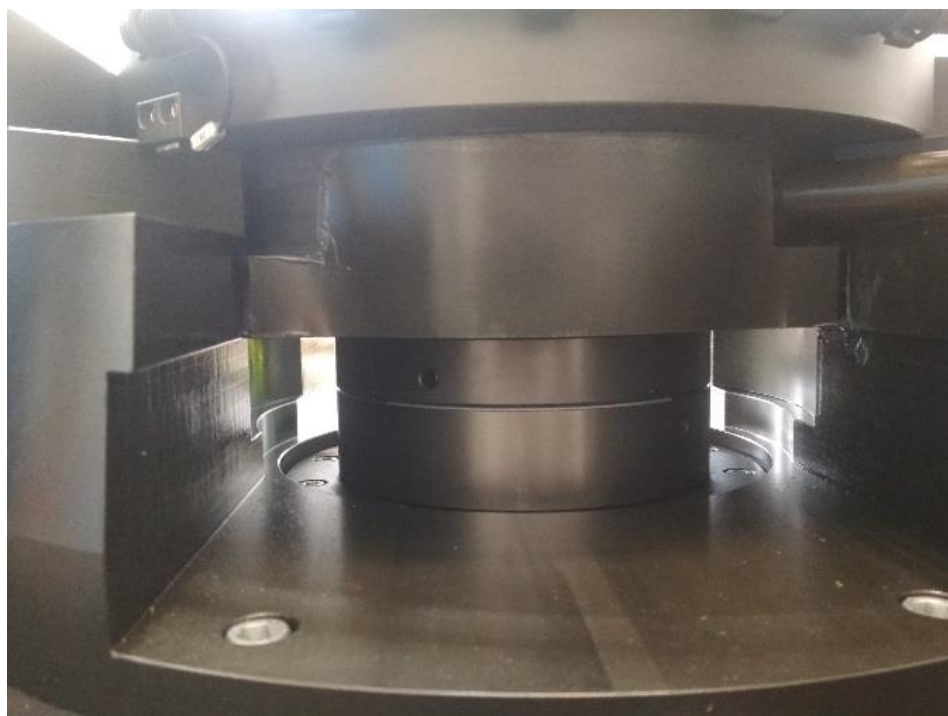
Obr. 28 Uzavřená zkušební komora [zdroj vlastní]

5. Vysunutí přídržovače

Před vlastním spuštěním zkoušky je třeba vytvořit tlak přídržovače. Přídržovač tímto tlakem sevře plech proti tažnici. Kroky uzavírání přídržovače jsou zachyceny na následujících obrázcích (Obr. 29 a Obr. 30).



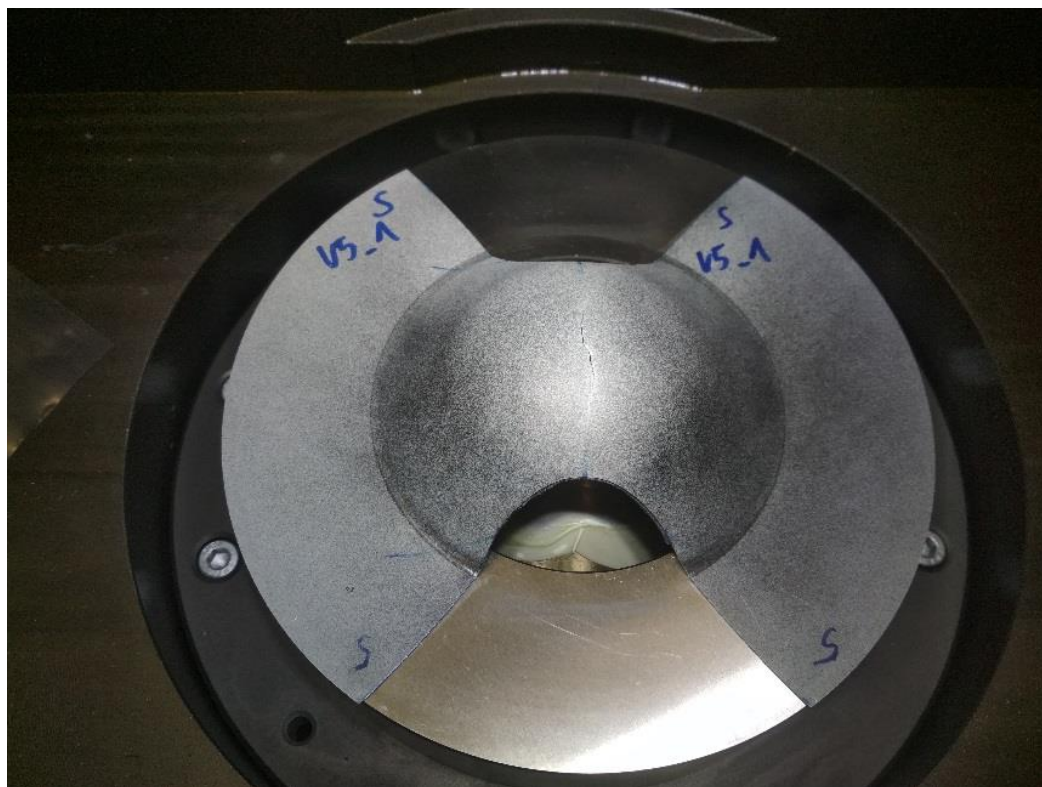
Obr. 29 Zkušební komora před vysunutím přídržovače [zdroj vlastní]



Obr. 30 Zkušební komora po vysunutí přídržovače [zdroj vlastní]

6. Spuštění zkoušky

Tento krok spočívá ve spuštění zkoušky v systému ARAMIS (spuštění kamer, které provádějí záznam zkoušky) a dále pak pohybu tažníku, který realizuje vlastní deformaci zkušební vzorku. Výsledek zkoušky, zkušební vzorek s trhlinou, je zobrazen na následujícím obrázku (Obr. 31).

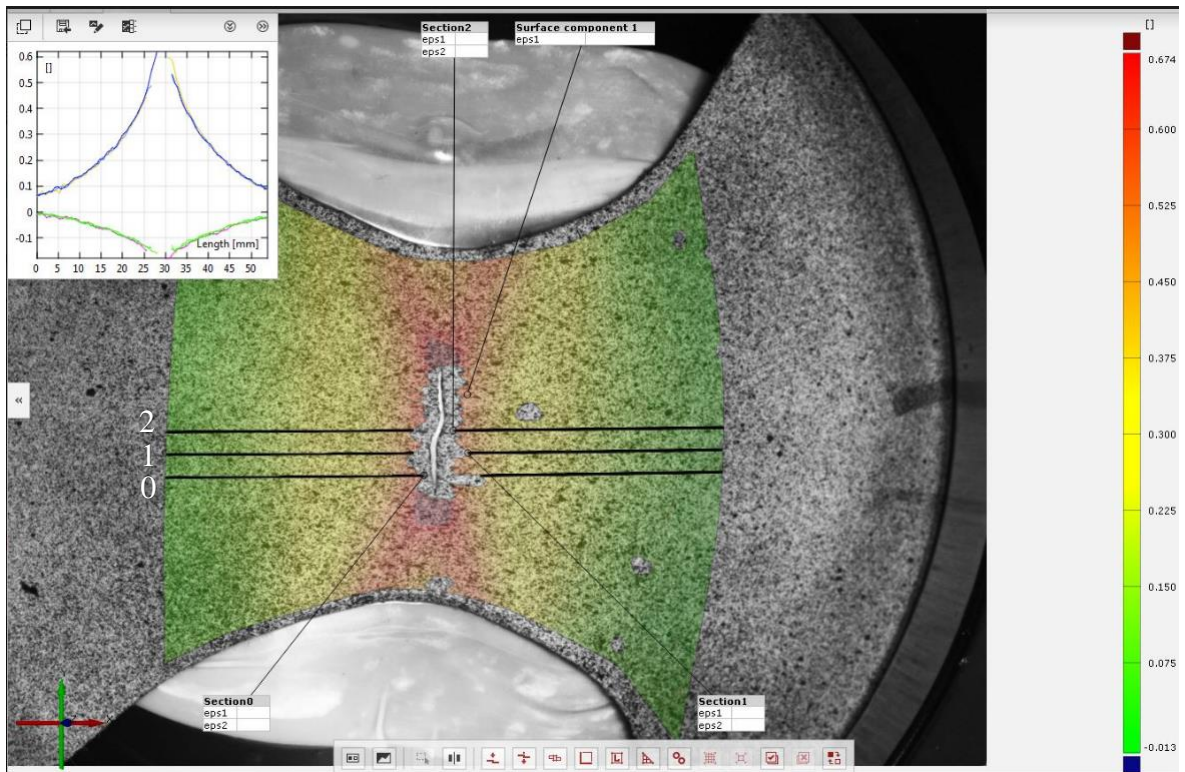


Obr. 31 Vzorek s trhlinou po skončení zkoušky [zdroj vlastní]

5.6 Vyhodnocování naměřených dat

Po provedené zkoušce jsou vyhodnoceny záznamy z kamer. Nejprve je třeba ořezat obrazové sekvence před vlastním začátkem deformace a dále sekvence po vzniku trhliny. Následně je provedena obrazová analýza průběhu deformace a ve vybraných řezech je určena velikost deformace v místě trhliny

Každé měření bylo vyhodnocováno ve třech řezech na zkušebním vzorku. Tyto řezy jsou označeny v řádcích jako „Section_0“, „Section_1“ a „Section_2“. Jejich poloha na vzorku je patrná z obrázku (Obr. 32).



Obr. 32 Zobrazení měřených řezů [zdroj vlastní]

Z jednoho vzorku jsou tedy získány tři hodnoty pro hlavní deformaci φ_1 a tomu odpovídající hodnoty vedlejší deformace φ_2 .

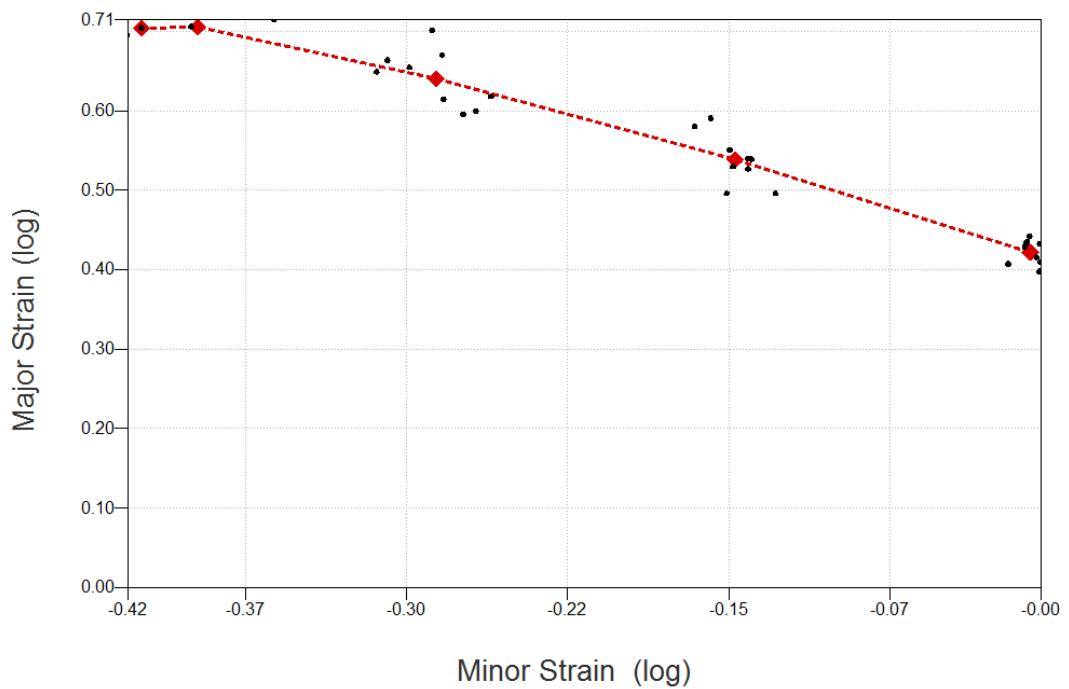
System ARAMIS umožňuje v jednom z modulů automaticky z jednotlivých naměřených hodnot vytvořit graf mezních přetvoření.

Níže jsou uvedena naměřená data pro jednotlivé způsoby přípravy zkušebních vzorků.

5.6.1 Naměřená data pro výrobu vzorků broušením

Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro broušení [zdroj vlastní]

Měření č.	Příprava + označení vzorků	Geometrie 1= 5mm		Geometrie 2= 10mm		Geometrie 3= 20mm		Geometrie 4= 40mm		Geometrie 5= 80mm	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	Broušení_1_Section_0					0,663	-0,309	0,496	-0,151	0,407	-0,02
	Broušení_1_Section_1					0,701	-0,288	0,529	-0,148	0,428	-0,012
	Broušení_1_Section_2					0,649	-0,314	0,59	-0,158	0,435	-0,011
2	Broušení_2_Section_0			0,695	-0,43	0,599	-0,268	0,539	-0,141	0,397	-0,005
	Broušení_2_Section_1	0,704	-0,423			0,595	-0,273	0,55	-0,149	0,415	-0,007
	Broušení_2_Section_2					0,654	-0,298	0,58	-0,166	0,409	-0,005
3	Broušení_3_Section_0					0,614	-0,283	0,495	-0,128	0,432	-0,005
	Broušení_3_Section_1			0,715	-0,362	0,67	-0,283	0,539	-0,139	0,441	-0,01
	Broušení_3_Section_2			0,705	-0,4	0,618	-0,26	0,526	-0,141	0,433	-0,011
	Průměr	0,704	-0,423	0,705	-0,397	0,640	-0,286	0,538	-0,147	0,422	-0,010



FLC

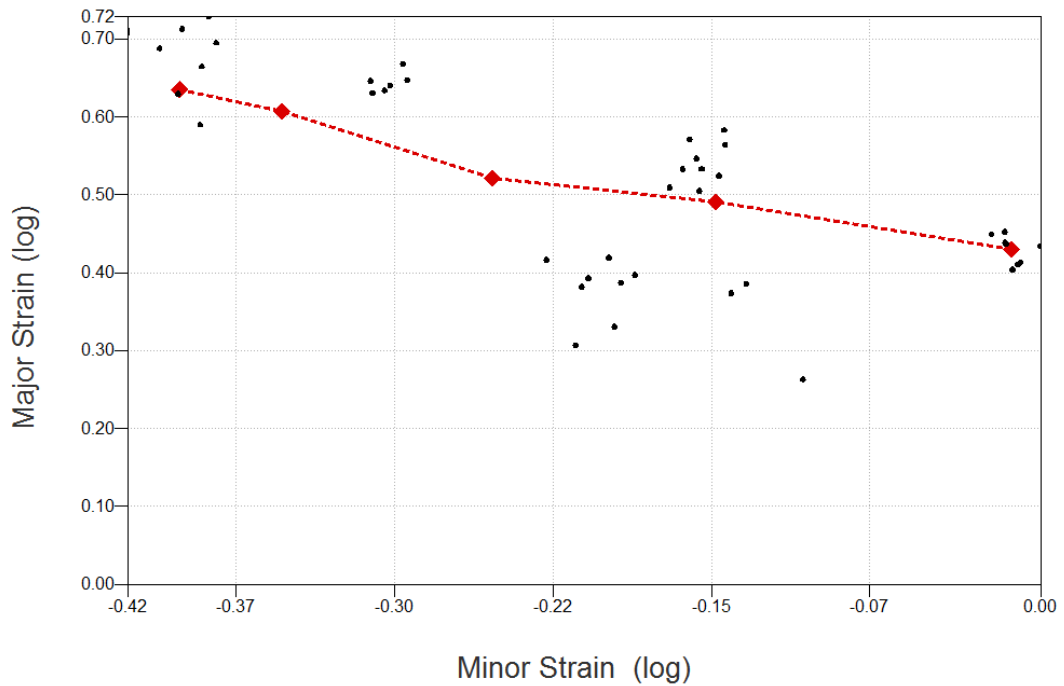
gom
www.gom.com

Obr. 33 FLC křivka pro broušení [zdroj vlastní]

5.6.2 Naměřená data pro vzorky vyrobené pomocí laseru

Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro laser [zdroj vlastní]

Měření č.	Příprava + označení vzorků	Geometrie 1= 5mm		Geometrie 2= 10mm		Geometrie 3= 20mm		Geometrie 4= 40mm		Geometrie 5= 80mm	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	Laser_1_Section_0					0,44	-0,216	0,583	-0,144	0,404	-0,007
	Laser_1_Section_1	0,688	-0,411	0,306	-0,214	0,444	-0,213	0,545	-0,155	0,41	-0,005
	Laser_1_Section_2			0,33	-0,196	0,439	-0,215	0,538	-0,163	0,413	-0,004
2	Laser_2_Section_0			0,664	-0,391	0,438	-0,23	0,373	-0,145	0,439	-0,011
	Laser_2_Section_1	0,629	-0,402	0,695	-0,384	0,435	-0,228	0,386	-0,133	0,437	-0,011
	Laser_2_Section_2			0,707	-0,426	0,439	-0,218	0,299	-0,116	0,452	-0,011
3	Laser_3_Section_0			0,71	-0,426	0,679	-0,33	0,564	-0,143	0,437	-0,01
	Laser_3_Section_1	0,59	-0,392	0,729	-0,387	0,688	-0,315	0,571	-0,16	0,434	0,006
	Laser_3_Section_2			0,712	-0,4	0,698	-0,311	0,559	-0,169	0,449	-0,017
	Průměr	0,636	-0,402	0,607	-0,353	0,522	-0,253	0,491	-0,148	0,431	-0,008



FLC

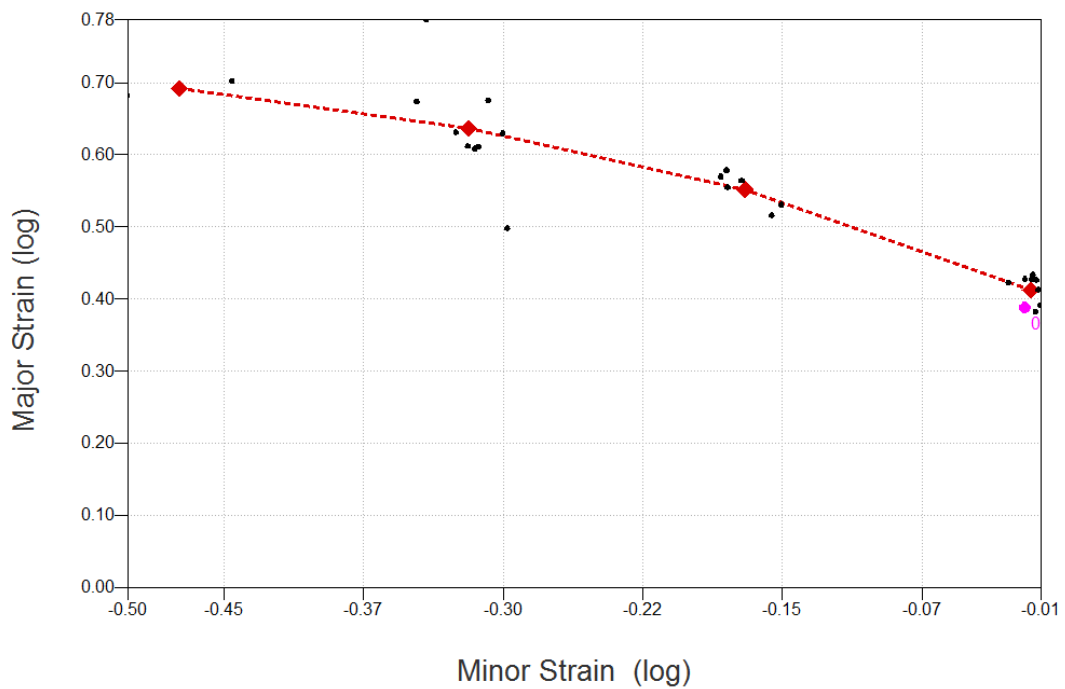
gom
www.gom.com

Obr. 34 FLC křivka pro laser [zdroj vlastní]

5.6.3 Naměřená data pro vzorky vyrobené vykružováním

Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro vykružování [zdroj vlastní]

Měření č.	Příprava + označení vzorků	Geometrie 1= 5mm		Geometrie 2= 10mm		Geometrie 3= 20mm		Geometrie 4= 40mm		Geometrie 5= 80mm	
		φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
1	Vykružování_1_Section_0			0,682	-0,502	0,612	-0,319	0,53	-0,15	0,433	-0,015
	Vykružování_1_Section_1			0,702	-0,446	0,675	-0,308	0,555	-0,179	0,427	-0,019
	Vykružování_1_Section_2					0,631	-0,325	0,516	-0,156	0,422	-0,028
2	Vykružování_2_Section_0					0,498	-0,298	0,569	-0,183	0,391	-0,011
	Vykružování_2_Section_1					0,673	-0,346	0,578	-0,18	0,382	-0,014
	Vykružování_2_Section_2					0,787	-0,341	0,564	-0,172	0,427	-0,016
3	Vykružování_3_Section_0					0,611	-0,313			0,413	-0,012
	Vykružování_3_Section_1					0,629	-0,3			0,426	-0,013
	Vykružování_3_Section_2					0,608	-0,315			0,388	-0,019
	Průměr			0,692	-0,474	0,636	-0,318	0,552	-0,170	0,412	-0,016



FLC

gom
www.gom.com

Obr. 35 FLC křivka pro vykružování [zdroj vlastní]

6 Zhodnocení naměřených dat

Z výše uvedených tabulek je patrné, že ne všechny provedené zkoušky bylo možné vyhodnotit. Hlavními problémy byly kvalita soudržnosti měrné sítě a čitelnost sítě po deformaci.

Jak již bylo uvedeno výše, tvar zkušebních těles neodpovídal požadavkům normy. Cílem tohoto experimentu bylo ověření vlivu různých metod přípravy zkušebních vzorků, které se projevuje ve zpevnění hrany či vzniku mikrotrhlin, které ovlivní výslednou polohu mezních křivek. S rostoucí šířkou měřené části se bude snižovat vliv zpevnění hrany či vzniku mikrotrhlin v oblasti hrany. Proto snahou bylo provedení měření na vzorku s šířkou od 5 mm.

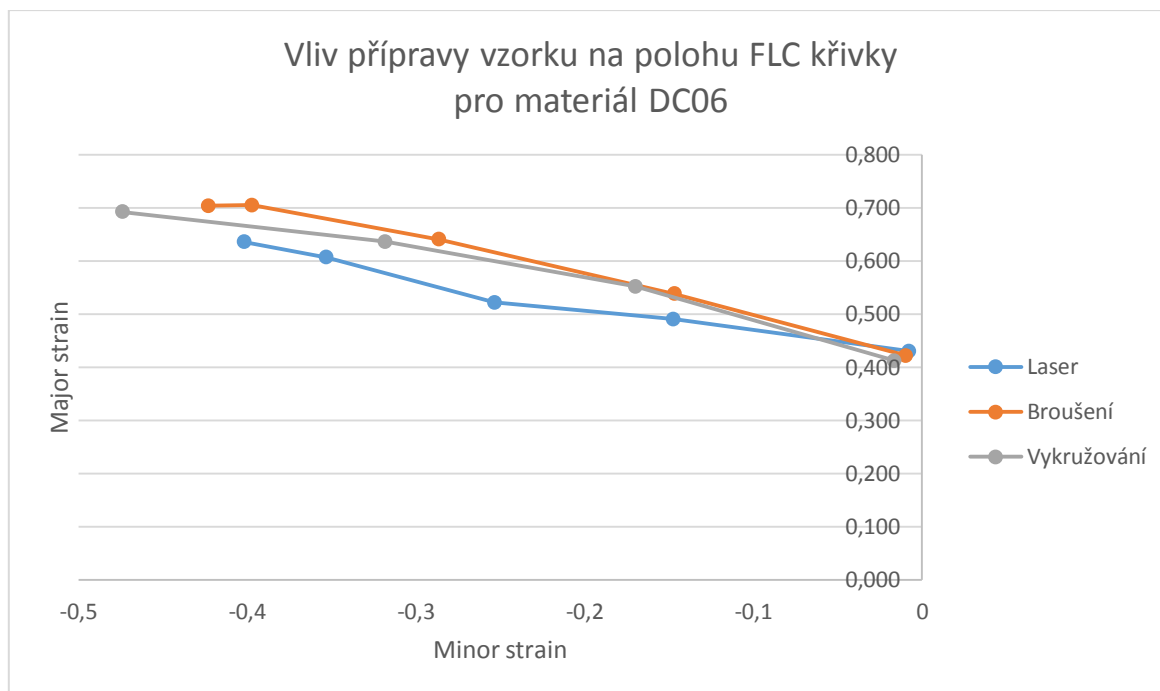
U vzorků s nejmenší šířkou se však v největší míře projevovala nedostatečná kvalita měrné sítě, kdy síť po deformaci nebyla dostatečně čitelná pro vyhodnocení deformace. Dále, jak bylo zmíněno výše, byla limitní deformace vyhodnocována na každém vzorku ve třech navzájem rovnoběžných řezech, které byly od sebe určitým způsobem vzdáleny. Velikost této vzdálenosti je možné určitým způsobem měnit, avšak při tomto způsobu deformace se výrazně mění šířka, čímž je třeba umístit řezy pro vyhodnocení ještě blíže k sobě, což nebylo zcela možné. Ne vždy se tedy podařilo umístit všechny tři řezy na zkušební vzorek a ne vždy se podařilo z důvodu čitelnosti sítě všechny řezy vyhodnotit.

Poměrně značným problémem byla soudržnost měrné sítě, kdy u malých šířek vzorků byla velmi často neměřitelná.

Pro celkové porovnání byly naměřené hodnoty pro jednotlivé geometrie zprůměrovány a následně z nich byl vytvořen graf, který obsahuje křivky mezních deformací pro všechny tři způsoby přípravy zkušebních vzorků.

Tabulka 6 Zprůměrované naměřené hodnoty [zdroj vlastní]

Zprůměrované hodnoty z předchozích tabulek										
Příprava + označení vzorků	Geometrie 1= 5mm		Geometrie 2= 10mm		Geometrie 3= 20mm		Geometrie 4= 40mm		Geometrie 5= 80mm	
	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]	φ_1 [-]	φ_2 [-]
Laser	0,636	-0,40167	0,606625	-0,353	0,522222	-0,25289	0,490889	-0,14756	0,430556	-0,00778
Broušení	0,704	-0,423	0,705	-0,397	0,640333	-0,28622	0,538222	-0,14678	0,421889	-0,00956
Vykružování			0,692	-0,474	0,636	-0,31833	0,552	-0,17	0,412111	-0,01633



Obr. 36 FLC křivky z průměrných hodnot [zdroj vlastní]

Z grafu je patrné, že největších deformací do porušení bylo schopné dosáhnout u vzorků připravených broušením. Křivky pro vzorky vyrobené pomocí laseru a vykružování dosahují nižších hodnot, což může být způsobeno jejich ovlivněním při jejich přípravě. Nejvíce odlišné varianty, čili broušení a laser, se v nejkrajnějším levém bodě liší přibližně o 10%, pro větší šířky zkušebního tělesa se tyto rozdíly snižují.

7 Závěr

Moje bakalářská práce se zabývá vlivem jednotlivých metod přípravy zkušebního tělesa na velikost mezních přetvoření.

Úvodní kapitoly popisují vysvětlení pojmů, jako je tváření, tvářitelnost a vlivy, kterými je tvářitelnost ovlivňována. Jsou zde popsány způsoby používané ke stanovení jak tvářitelnosti, tak i dalších vlastností materiálů se zaměřením na plechy používané v automobilovém průmyslu. Následuje kapitola pojednávající o vybraných ocelích, které jsou používány ke stavbě karoserie automobilu v automobilovém průmyslu.

Další kapitola slouží jako hlavní teoretický podklad pro experimentální část. V této kapitole popisují tvorbu křivek mezní tvářitelnosti, zkoušky pro to používané (Nakajima test) a systém ARAMIS, pomocí kterého je možné zkoušky vyhodnocovat. Jsou zde také popsány tvary zkušebních těles a princip zkoušení.

V páté kapitole se zabývám vlastní experimentální částí práce. Popsal jsem zvolené tvary zkušebních těles, které jsem volil pro určení vlivu přípravy zkušebního tělesa na velikost mezních přetvoření. Dále provádím popis způsobu přípravy zkušebních těles. Popisují také způsob předúprav a vytváření měrné sítě pro vyhodnocení mezních přetvoření, jednotlivé kroky zkoušení a zkušební podmínky.

V následující kapitole jsem provedl vyhodnocení provedených experimentů. Z naměřených dat je patrné, že každá metoda přípravy zkušebního tělesa ovlivňuje polohu mezních přetvoření. V oblasti nejmenší šířky zkušebního tělesa byl největší rozdíl cca 10 %, pro větší šířky zkušebního tělesa se rozdíl mezi jednotlivými metodami snižuje.

V průběhu zkoušení se vyskytly problémy, které mohly naměřená data zkreslit. Prvním problémem bylo porušení nanesené měrné sítě vlivem deformace a druhým pak malé rozměry zvláště u prvních dvou geometrií vzorků. Nedostatečná soudržnost měrné sítě se projevovala především u menších šířek zkušebních těles, mohla být způsobena nedostatečným odmaštěním, ale také velkou deformací především v hlavním směru. Malé rozměry šířky zkušebního tělesa znamenaly nedostatečnou šířku pro vytvoření všech řezů, pokud se vzorek podařilo vyhodnotit z hlediska soudržnosti měrné sítě, pro nejmenší šířku bylo možné umístit pouze jeden řez.

U vzorků vyráběných laserem je velké rozpětí hodnot pro zvláště malé šířky zkušebního tělesa. Vzhledem k tomu, že není k dispozici informace, kde byl začátek a konec řezu, může to být jako jedno z vysvětlení rozdílů mezi velkými rozdíly v rámci jedné

geometrie zkušebního tělesa. Dalším vysvětlením může být značné ovlivnění hrany laseru, které se projeví velkým rozdílem naměřených hodnot mezních deformací.

Zvolené šířky zkušebních vzorků jsou od 5 mm v nejužší části, což je výrazně méně, než připouští norma. Proto je akceptovatelné, že se pro tyto tvary vzorků nepodařilo získat výsledky v plném rozsahu. Z provedených analýz plyne, že největší rozdíly výsledků jsou u nejmenších šířek zkušebních těles, s rostoucí šířkou se tento rozdíl zmenšuje. Z důvodu anomálií z hlediska velkého rozsahu naměřených hodnot u laserem připravených vzorků by bylo vhodné experimenty zopakovat a věnovat pozornost parametrům řezání a poloze začátku a konce řezání.

Seznam použité literatury

- [1] ŠIMON, Petr. Karosérie osobního automobilu. 2015, Škoda Auto a. s. [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/18241549-Karoserie-osobniho-automobilu-ing-petr-simon-skoda-auto-a-s-04-03-2015.html>
- [2] VLK, František. Karosérie motorových vozidel: ergonómika : biomechanika : pasivní bezpečnost : kolize : struktura : materiály. Brno: VLK, 2000. ISBN 80-238-5277-9.
- [3] Automotive Steels: Design, Metallurgy, Processing and Applications. Amsterdam: Elsevier, [2017]. ISBN 978-0-08-100638-2.
- [4] GIRMAN, Vladimír. Kovové materiály automobilových konstrukcí - II Karoséria a karosárenské plechy [online]. 2012 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: https://www.materialing.com/materialy_auto_konstrukcii
- [5] Steel Definitions: Today's AHSS for Automotive. *Www.worldautosteel.org* [online]. [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.worldautosteel.org/steel-basics/automotive-steel-definitions/>
- [6] 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 isbn978-80-214-4747-9.
- [7] FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN isbn80-214-2374-9.
- [8] THEIS, Henry E. Handbook of metalforming processes [online]. New York: Marcel Dekker, c1999 [cit. 2019-08-01]. ISBN 08-247-9317-X. Dostupné z: https://books.google.cz/books?id=jNpv_RQKdc0C&printsec=copyright&hl=cs&source=gs_b%20pub_info_r#v=onepage&q&f=false
- [9] Katedra strojírenské technologie Technické univerzity v Liberci. Technologie II [online]. TU v Liberci [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce/01.htm
- [10] TATÍČEK, František. *Vliv materiálu na kvalitu výlisku* [online]. 2018 [cit. 2019-08-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/vliv-materialu-na-kvalitu-vylisku.html>
- [11] ČSN EN ISO 12004-2. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení křivek mezní tváritelnosti - Část 2: Stanovení křivek mezní tváritelnosti v laboratoři*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.
- [12] TATÍČEK, František. Osobní sdělení vedoucího skupiny tváření (České vysoké učení v Praze, Technická 4, Praha) dne 25. května 2019.

- [13] PETRUŽELKA, Jiří a Richard BŘEZINA. *Úvod do tváření I*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2001. ISBN 8070788771.
- [14] JURČIŠIN, Miroslav. *Experimentální měření křivky mezních deformací* [online]. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/experimentalni-mereni-krivky-meznich-deformaci.html>
- [15] BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia*. Bratislava: Nakladateľstvo STU, 2010. Edícia vysokoškolských učebníc. ISBN 978-80-227-3242-0.
- [16] LIDMILA, Zdeněk. *Teorie a technologie tváření*. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN isbn978-80-7231-579-6.
- [17] ARAMIS. *Www.mcae.cz* [online]. MCAE Systems [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.mcae.cz/cs/produkty/ARAMIS-opticky-system-pro-analyzu-3d-pohybu-a-3d-deformaci/>
- [18] ARAMIS. *Www.gom.com* [online]. GOM [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/ARAMIS.html>
- [19] Cold-rolled steel strip: Technical Terms of Delivery. Voestalpine [online]. 2017 [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: https://www.voestalpine.com/division_stahl/content/download/21443/639172/file/voestalpine_technical_terms_of_delivery_cold-rolled_steel_strip_EN_20170331.pdf
- [20] MACEK, Karel. *Kovové materiály*. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80010-3513-1.
- [21] PILVOUSEK, Tomáš; TATÍČEK, František; ROLEČEK, Lubomír; BARISIC, B. The Effect of Strain Rate on the Properties and Microstructure of the DC 06 Steel. Proceedings of International Conference on Innovative Technologies IN-TECH. Jaroměř: Centrum pro povrchové úpravy, 2010, p. 628-632. ISBN 978-80-904502-2-6
- [22] Technologie tváření kovů [online]. BEROUN, Stanislav. [cit. 2019-08-02]. Dostupné z: <http://www.kvm.tul.cz/getFile/id:1886>
- [23] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvařitelnost kovových materiálů*. Upravená verze III. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, 2007.
- [24] Proč zkoušíme základní mechanické vlastnosti. *Http://physics.ujep.cz* [online]. [cit. 2019-08-03]. Dostupné z: http://physics.ujep.cz/~mkormund/P232/Vlastnosti_zkousky.pdf
- [25] Zkouška hlubokotažnosti. *Eluc.kr-olomoucky.cz* [online]. [cit. 2019-08-03]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1568>
- [26] Experimental investigation of forming limit curves and deformation features in warm forming of an aluminium alloy. *Core.ac.uk*[online]. [cit. 2019-08-03]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/77013562.pdf>
- [27] ČSN ISO 10113. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení součinitele plastické anizotropie*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009.

[28] ČSN ISO 10275. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Stanovení exponentu deformačního zpevnění tahem*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.

[29] ČSN EN ISO 20482. *Kovové materiály - Plechy a pásy - Zkouška hloubením podle Erichsena*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014.

[30] Vlastnosti kovových materiálů a jejich zkoušení. *Jhamernik.sweb.cz* [online]. [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/vlastnosti.htm>

[31] Product Information. *Www.zwickroell.com* [online]. [cit. 2019-08-04]. Dostupné z: https://www.zwickroell.com/-/media/files/sharepoint/vertriebsdoku_pi/11_508_product_information_sheet_metal_testing_machine_bup_400_bup_600_en.pdf

Seznam obrázků

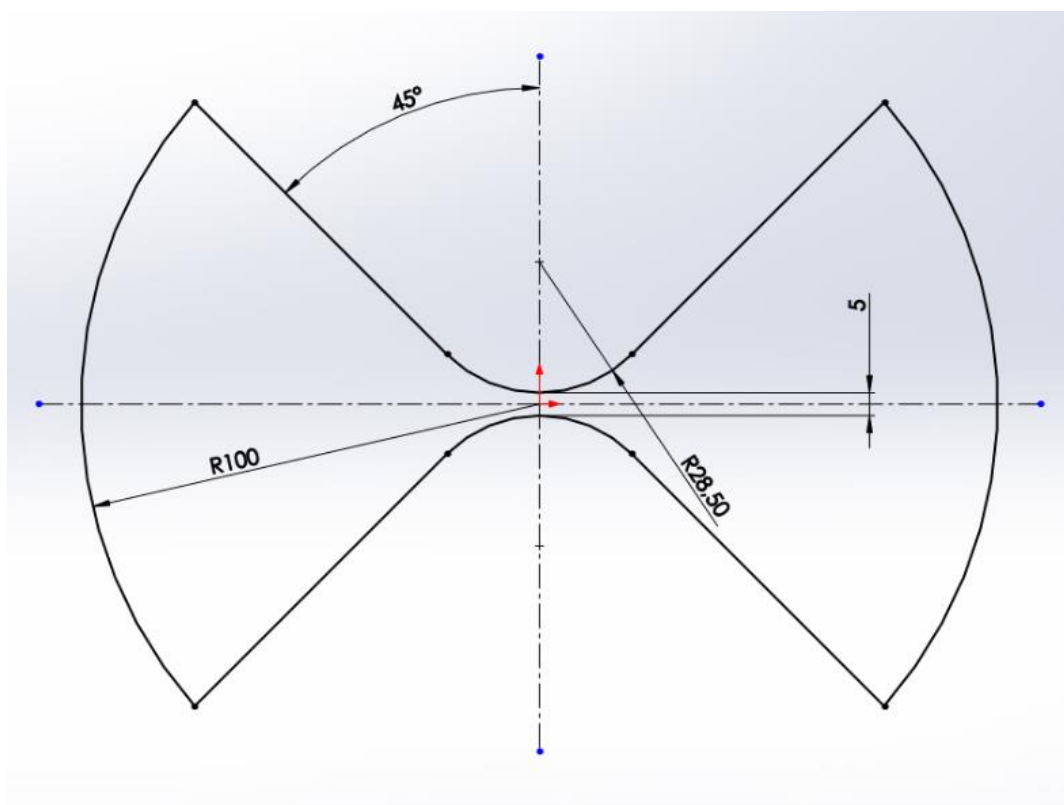
Obr. 1 Závislost přetvárného odporu na teplotě.....	12
Obr. 2 Poměr $R_{p0,2} / R_m$ jako ukazatele tváritelnosti.....	14
Obr. 3 Schéma zkoušky ohybem.....	16
Obr. 4 Schéma zkoušky hlubokotažnosti dle Erichsena.....	17
Obr. 5 Schéma kalíškovací zkoušky	18
Obr. 6 Schéma zkoušky rozšiřováním otvoru.....	19
Obr. 7 Schéma zkoušky střídavým ohybem	19
Obr. 8 Schéma zkoušky dvojitým ohybem.....	20
Obr. 9 Schéma zkoušky lámavosti	20
Obr. 10 Schéma Fukuiho zkoušky	21
Obr. 11 Schéma Tomlenovy zkoušky	22
Obr. 12 Schéma zkoušky Nakajima	27
Obr. 13 Keeler - Goodwinův diagram.....	28
Obr. 14 Typy deformací pro různé tvářecí operace	29
Obr. 15 Geometrie zkušebních vzorků odpovídající určité deformaci	30
Obr. 16 Tvar zkušebního vzorku.....	31
Obr. 17 Kamery s osvětlením jako součást systému ARAMIS od firmy GOM.....	33
Obr. 18 FLC křivka jako výstup měření.....	34
Obr. 19 Prostorově znázorněná deformace na dílu po provedené zkoušce Nakajima	34
Obr. 20 Vyřiznutí šablon	36
Obr. 21 Ukázka pracoviště pro vykružování	37
Obr. 22 Použité barvy a chemikálie k odmaštění.....	38
Obr. 23 Detail stochastické sítě.....	38
Obr. 24 Kontrolní panel s parametry zkoušky	39
Obr. 25 Nanesená kluzná vrstva na tažníku.....	40
Obr. 26 Vzorek umístěný ve zkušební komoře.....	41
Obr. 27 Vyhodnocení kvality sítě před zkouškou.....	42
Obr. 28 Uzavřená zkušební komora	43
Obr. 29 Zkušební komora před vysunutím přidržovače	44
Obr. 30 Zkušební komora po vysunutí přidržovače	44
Obr. 31 Vzorek s trhlinou po skončení zkoušky.....	45
Obr. 32 Zobrazení měřených řezů	46

Obr. 33 FLC křivka pro broušení.....	47
Obr. 34 FLC křivka pro laser	48
Obr. 35 FLC křivka pro vykružování.....	49
Obr. 36 FLC křivky z průměrných hodnot	51

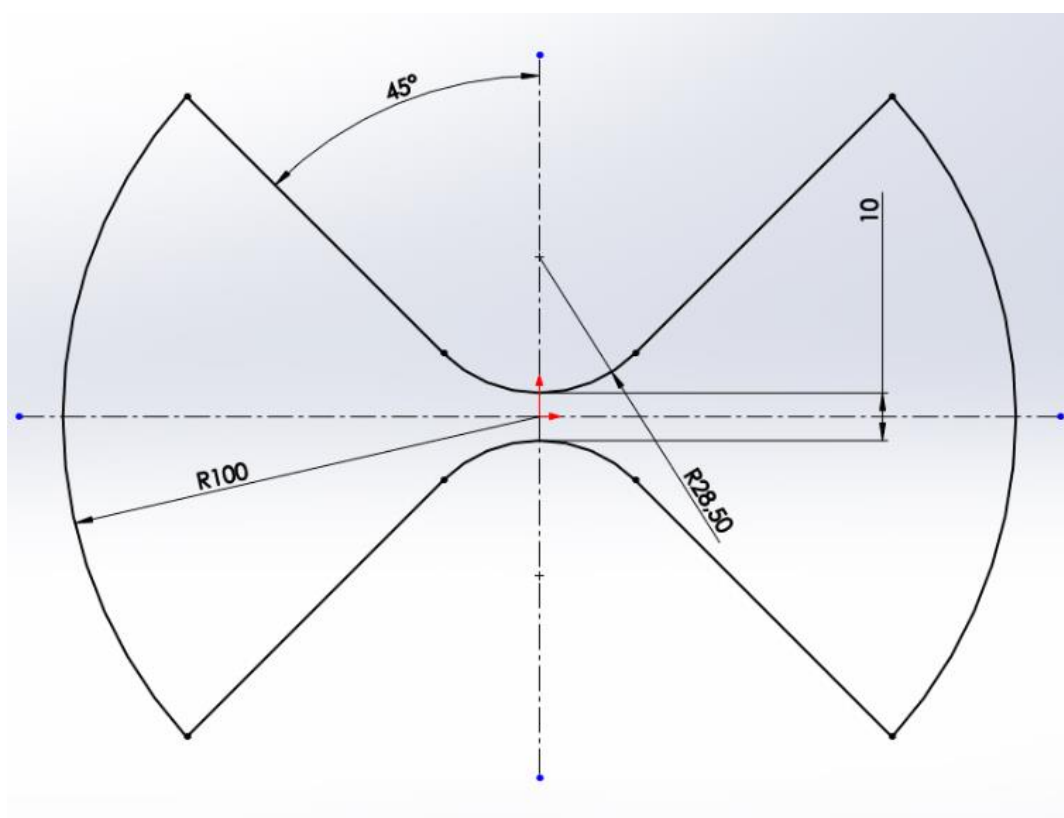
Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení materiálu DC ZE50/50BPO	26
Tabulka 2 Mechanické vlastnosti materiálu DC06 ZE50/50 BPO	26
Tabulka 3 Naměřené hodnoty pro broušení.....	47
Tabulka 4 Naměřené hodnoty pro laser	48
Tabulka 5 Naměřené hodnoty pro vykružování.....	49
Tabulka 6 Zprůměrované naměřené hodnoty	51

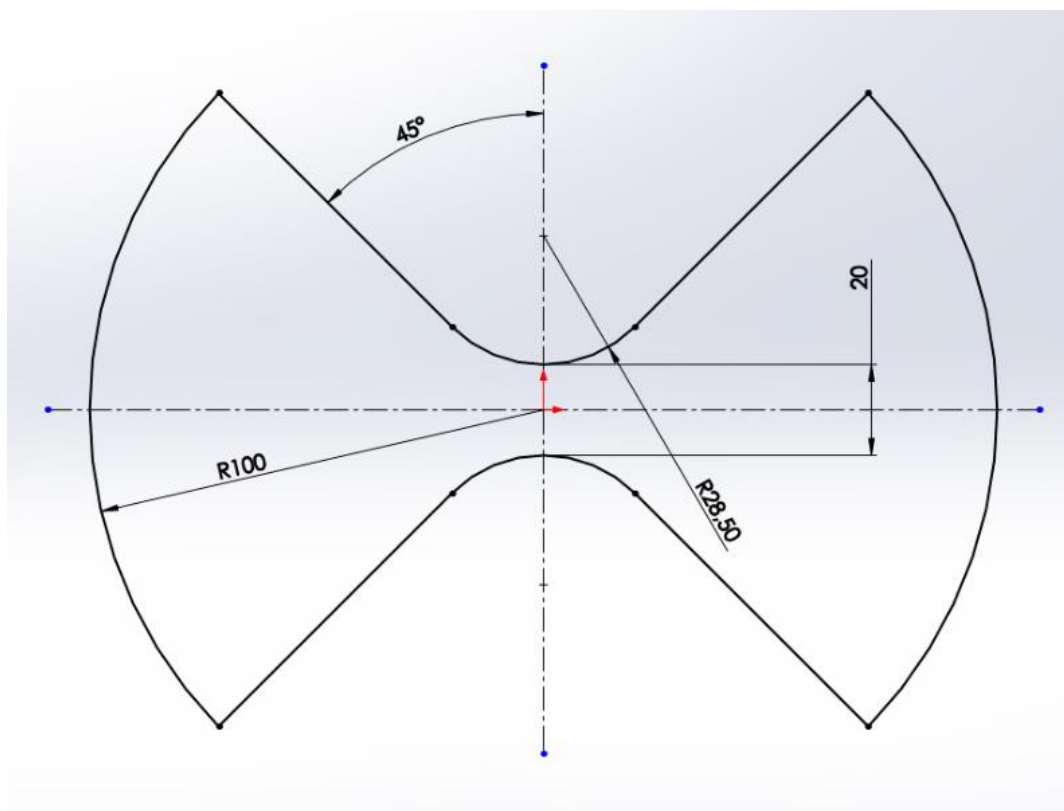
Příloha 1 – Tvar zkušebních vzorků



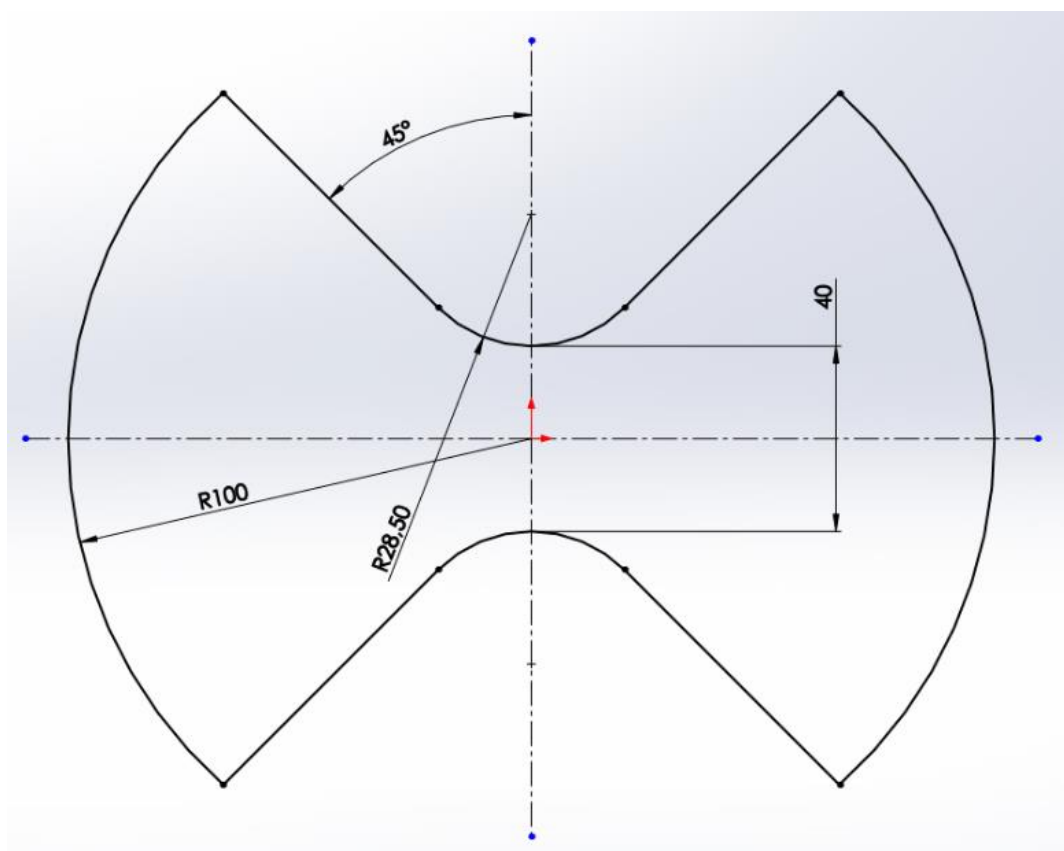
Příloha 1 Geometrie 1 [zdroj vlastní]



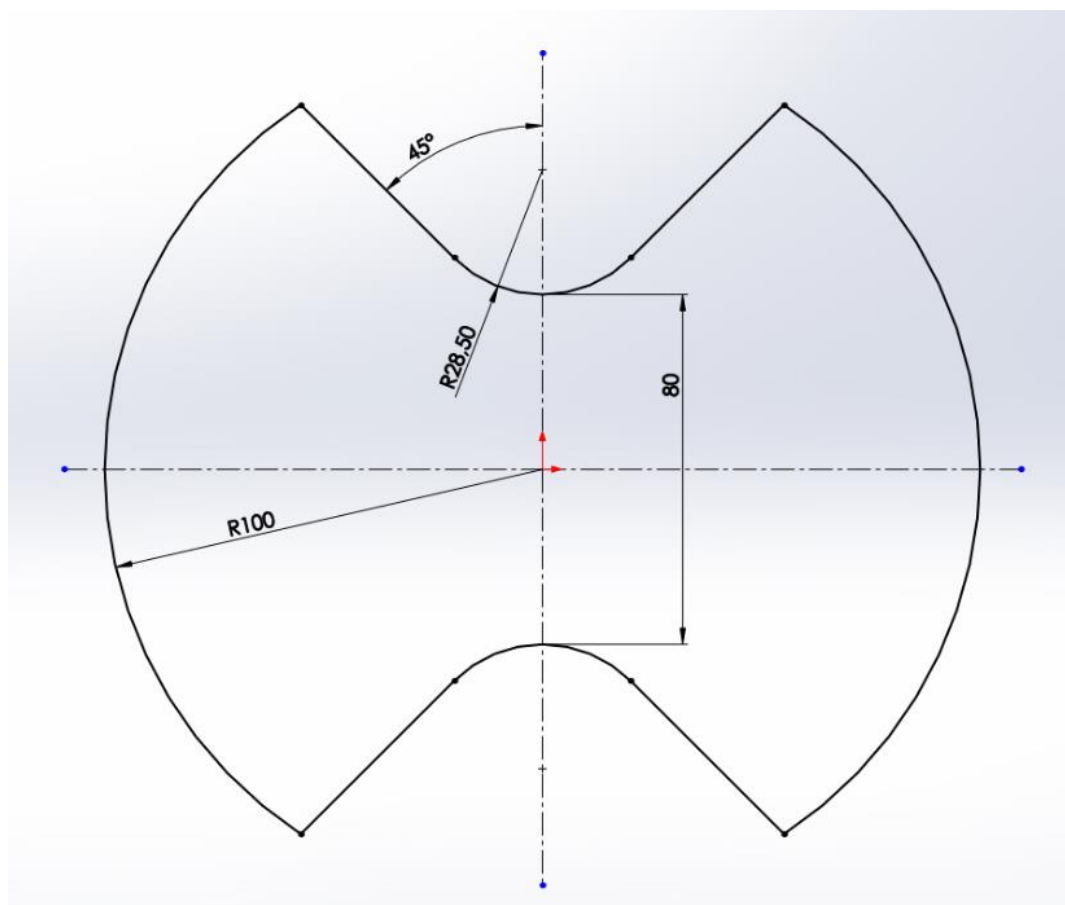
Příloha 1 Geometrie 2 [zdroj vlastní]



Příloha 1 Geometrie 3 [zdroj vlastní]

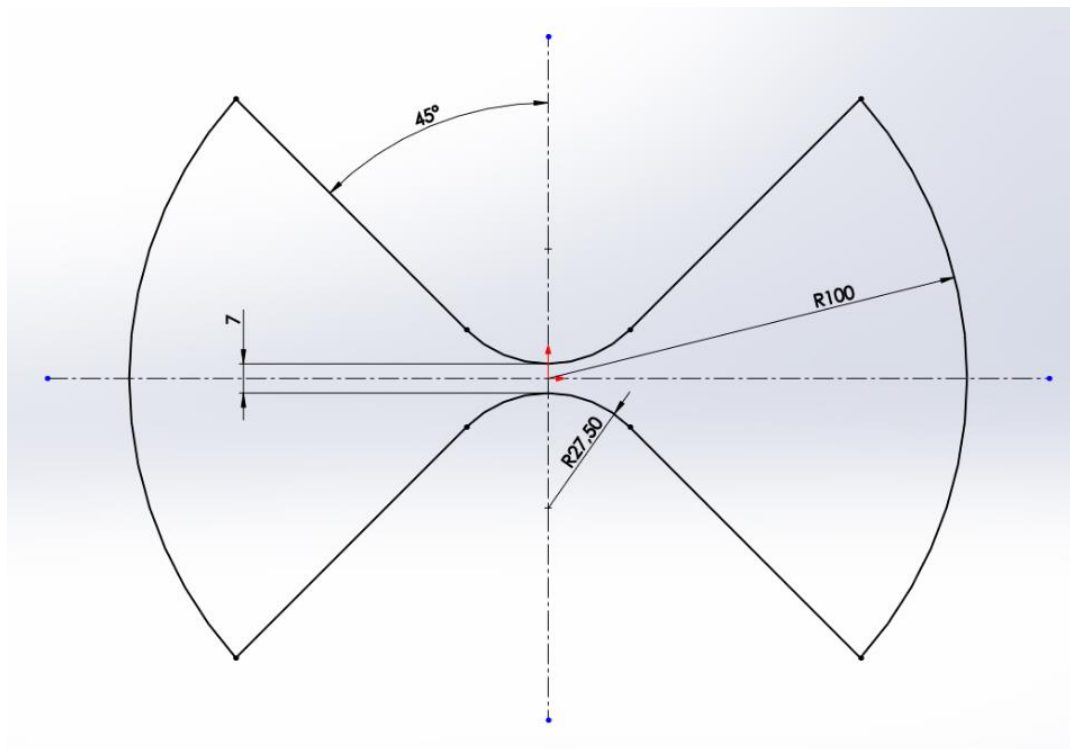


Příloha 1 Geometrie 4 [zdroj vlastní]

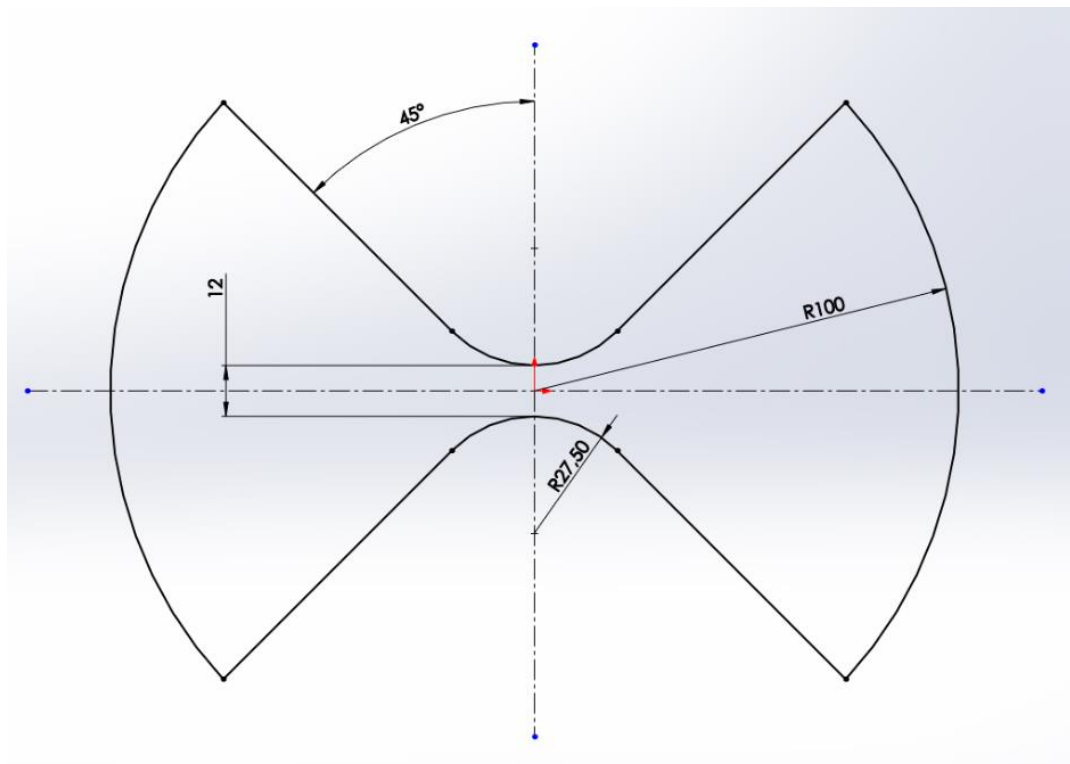


Příloha 1 Geometrie 5 [zdroj vlastní]

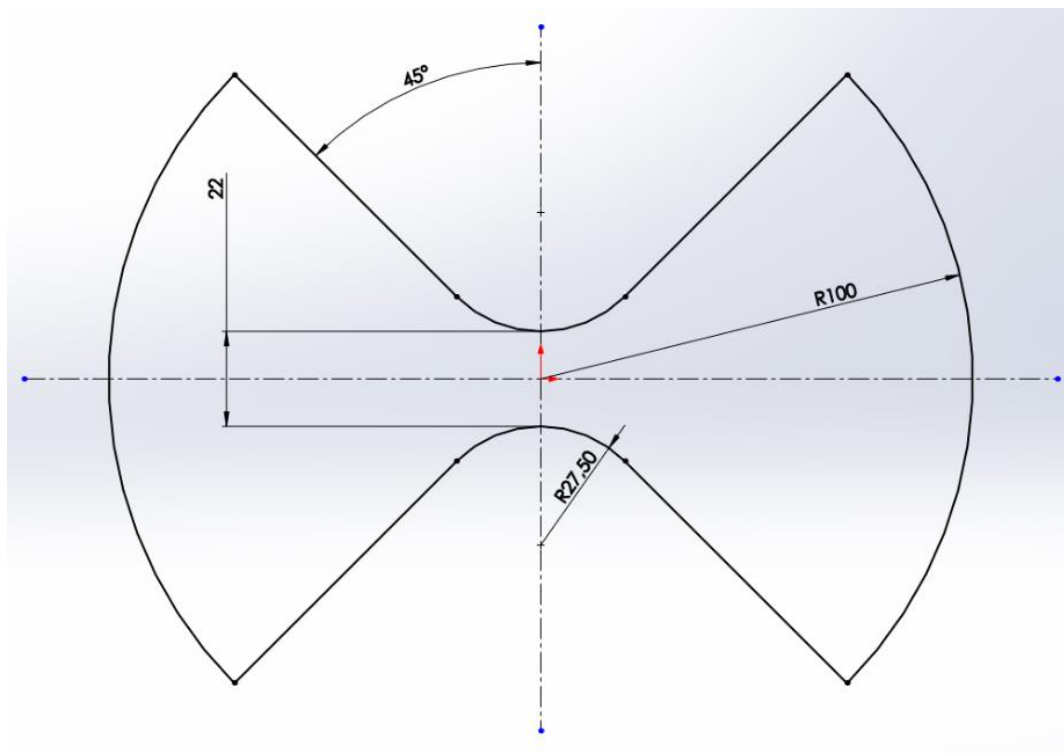
Příloha 2 – tvar zkušebních vzorků s přídavkem



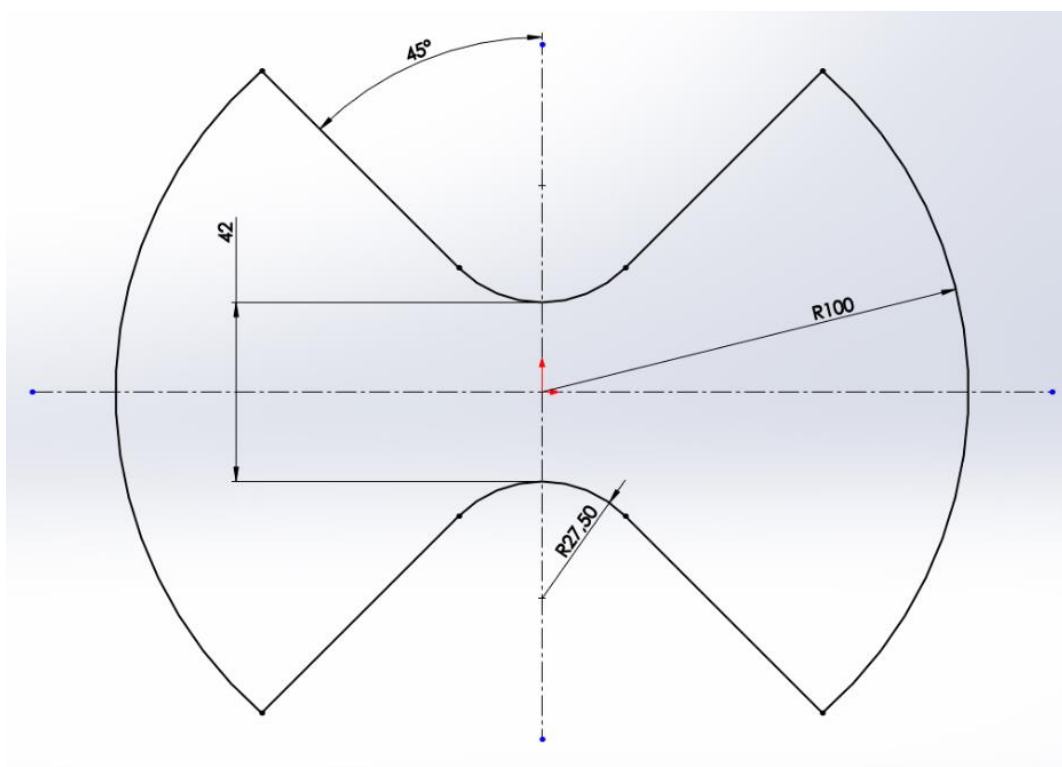
Příloha 2 Geometrie 1 s přídavkem [zdroj vlastní]



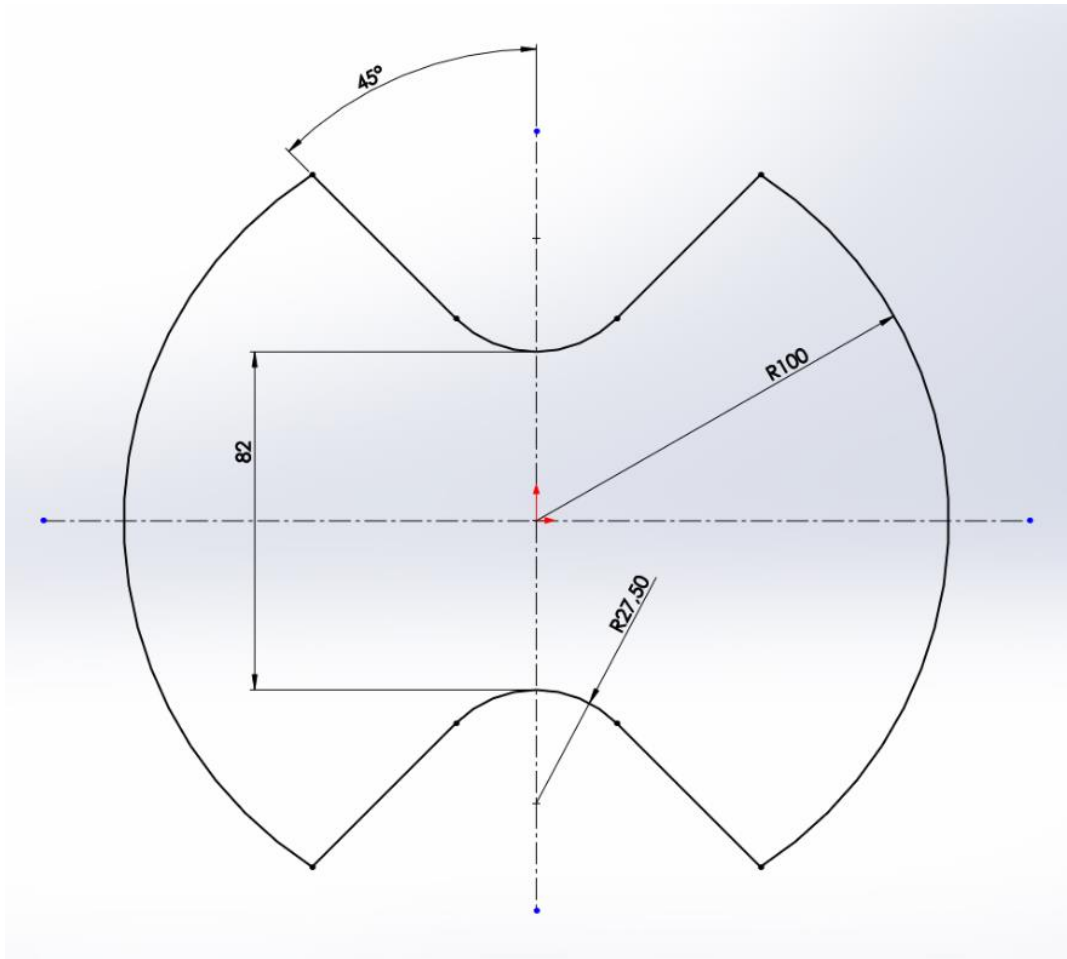
Příloha 2 Geometrie 2 s přídavkem [zdroj vlastní]



Příloha 2 Geometrie 3 s přídavkem [zdroj vlastní]

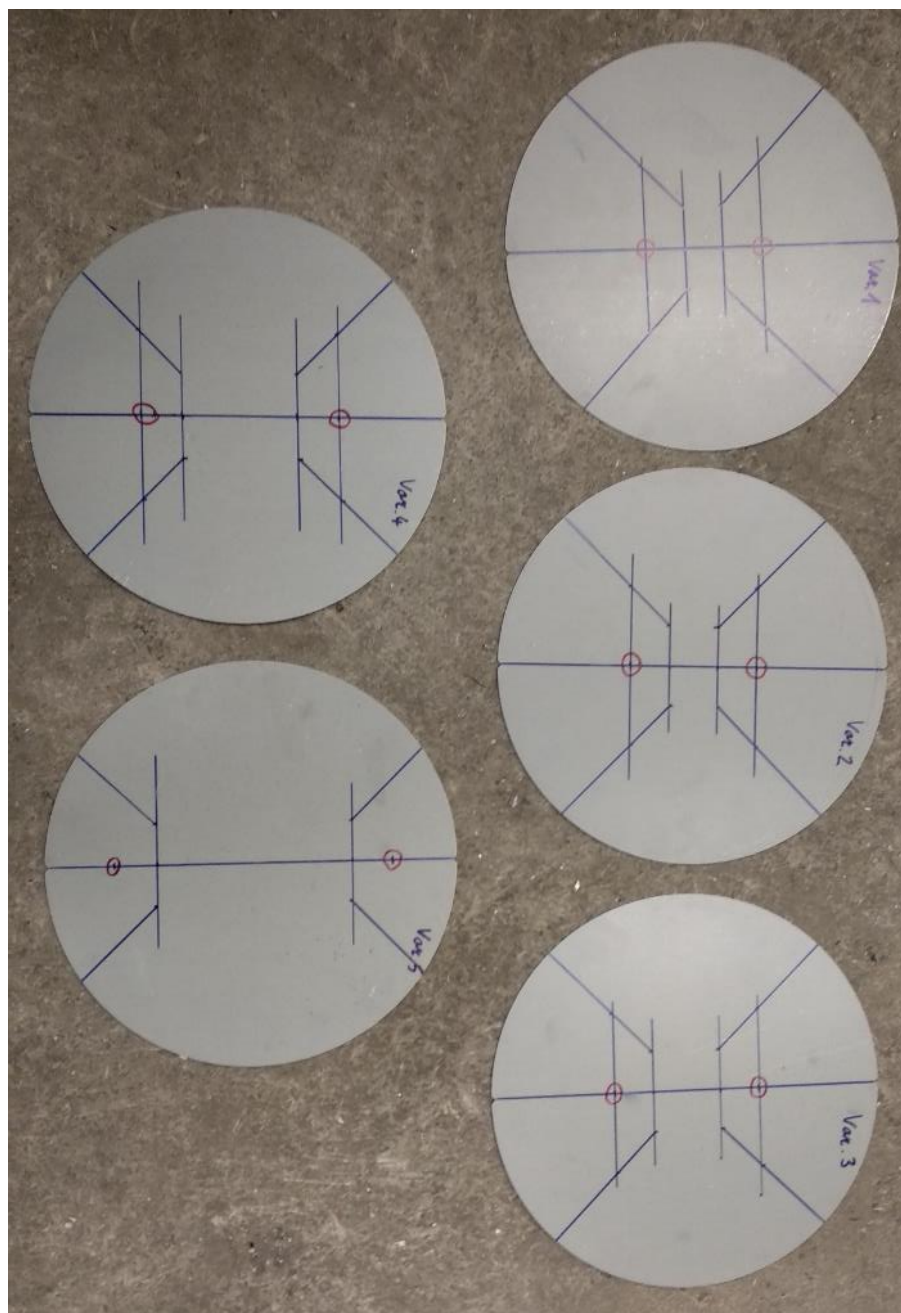


Příloha 2 Geometrie 4 s přídavkem [zdroj vlastní]



Příloha 2 Geometrie 5 s přídatkem [zdroj vlastní]

Příloha 3



Příloha 3 Vzorky s narysovaným středem pro vykružovací vrták [zdroj vlastní]

Příloha 4



Příloha 4 Sada použitých nástrojů [zdroj vlastní]