

**ČESKÉ VYSOKÉ  
UČENÍ TECHNICKÉ  
V PRAZE**

**FAKULTA  
STROJNÍ**



**DIPLOMOVÁ  
PRÁCE**

**2022**

**FILIP  
KETTNER**

## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kettner** Jméno: **Filip** Osobní číslo: **474821**  
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**  
Zadávající katedra/ústav: **Ústav strojírenské technologie**  
Studijní program: **Výrobní inženýrství**  
Specializace: **Bez specializace**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Ověřování chování materiálu při zkoušce rozšiřování otvoru**

Název diplomové práce anglicky:

**Verification of material behavior during Hole Expansion Test**

Pokyny pro vypracování:

- 1) Seznámení s problematikou tvářítečnosti při zpracování plechu
- 2) Návrh postupu realizace zkoušení
- 3) Ověření tvářítečnosti pro různé způsoby přípravy polotovaru
- 4) Srovnání a závěrečné zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

ČSN ISO 16630  
ASM Handbook Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming  
Sheet Metal Forming Processes and Die Design, Vukota Bojanovic  
Další literatura na doporučení vedoucího práce

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

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

Jméno a pracoviště druhého(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Vít Novák ústav strojírenské technologie FS**

Datum zadání diplomové práce: **21.04.2022** Termín odevzdání diplomové práce: **15.08.2022**

Platnost zadání diplomové práce: **31.12.2022**

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

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

doc. Ing. Miroslav Španiel, CSc.  
podpis oškana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

### **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnuté konzultace s vedoucím práce, panem Ing. Františkem Tatíčkem, PhD. a konzultantem panem Ing. Vítem Novákem. K vypracování jsem použil materiály uvedené v seznamu literatury.

Na Srubci dne 05.03.2022

.....

Bc. Filip Kettner

### **Poděkování**

Děkuji svému vedoucímu práce, panu Ing. Františku Tatičkovi, PhD., za pomoc a odborné poznatky při vypracování. Rovněž děkuji panu Ing. Vítu Novákovi, za cenné rady a připomínky k této práci.

V neposlední řadě chci poděkovat své rodině za silnou podporu při studiu.

## Anotace

<b>Vysoká škola</b>	ČVTU v Praze, Fakulta strojní
<b>Ústav</b>	Ústav strojírenské technologie
<b>Název bakalářské práce</b>	<b>Ověřování chování materiálu při zkoušce rozšiřování otvoru</b>
<b>Akademický rok</b>	2021/22
<b>Autor</b>	Bc. Filip Kettner
<b>Vedoucí práce</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.

### Abstrakt

Diplomová práce pojednává o určení a velikosti deformací v okolí otvoru, do kterého se určitou silou a rychlostí dostává zkušební nástroj. Otvory jsou vyrobeny různými způsoby a pozoruje se změna chování v okolí jednotlivých otvorů, kdy nástroj a podmínky zkoušky zůstávají stejné. Cílem mé práce je získat reálné parametry koeficientů, ze kterých lze vycházet při numerických simulacích a to např. jako okrajové podmínky či vstupní korekční součinitele. V experimentální části této práce se zabývám právě chováním a stanovení mezní deformací příslušných otvorů pro různé materiálové jakosti.

**Klíčová slova** Plošné tváření, rozšiřování otvoru, mezní deformace

### Rozsah práce a příloh

<b>Počet stran</b>	<b>60</b>
<b>Počet obrázků</b>	<b>34</b>
<b>Počet tabulek</b>	<b>11</b>

## Annotation

<b>University</b>	CTU in Prague, Faculty of Mechanical Engineering
<b>Department</b>	Department of Manufacturing Technology
<b>Title of work</b>	<b>Verification of material behavior during Hole Expansion Test</b>
<b>Academic year</b>	2021/22
<b>Author</b>	Bc. Filip Kettner
<b>Supervisor</b>	Ing. František Tatíček, Ph.D.

### Abstract

The diploma thesis deals with the determination and magnitude of deformations in the vicinity of the opening, into which a test tool enters with a certain force and speed. The holes are made in different ways and a change in behaviour around individual holes is observed when the tool and test conditions remain the same. The goal of my thesis is to obtain real parameters of coefficients that can be used in numerical simulations, e.g. as boundary conditions or input correction factors. In the experimental part of this thesis, the behaviour and determination of the limit deformations of the respective holes for different material qualities will be dealt with.

**Keywords** Surface forming, deformation, hole expansion test

### Volume of work

<b>Number of pages</b>	<b>60</b>
<b>Number of pictures</b>	<b>34</b>
<b>Number of tables</b>	<b>11</b>

## Obsah

1. Úvod a cíl diplomové práce .....	9
2. Tvářitelnost .....	10
2.1 Zkouška tahem .....	11
2.2 Erichsenova zkouška hlubokotažnosti .....	13
2.2.1. Zásoba plasticity .....	14
2.3. FLD diagramy.....	15
2.3 Numerické simulace .....	18
3. Mezní deformace na hraně materiálu.....	19
3.1 Diabolo test .....	20
3.2 Zkouška podle Nakajimi .....	22
3.3 Zkouška podle Kobeho.....	22
3.4 Optické systémy pro vyhodnocování deformací při HET.....	24
3.4.1. ARAMIS .....	24
3.4.1. ARGUS .....	25
4. Technologie výroby otvorů zkušebních vzorků pro zkoušku rozšiřování otvoru .....	28
4.1 Stříhání .....	28
4.2. Vrtání .....	29
4.3. Obrábění pomocí laseru .....	29
4.4. Elektroerozivní obrábění .....	31
5. Příprava zkušebních vzorků.....	33
5.1. HET pro materiál DX 57 .....	41
5.2. HET pro materiál DP500 .....	43
5.3. HET pro materiál DC06 .....	45
5.4. HET pro materiál DX56 .....	47
5.5. HET pro materiál HX180 .....	49
5.6. HET pro materiál ČSN 14 240.....	51
6. Závěr .....	54
7. Seznam použitých zdrojů a literatury.....	56
8. Seznam obrázků.....	59
9. Seznam tabulek .....	60

## Seznam použitých symbolů

Značka	Jednotka	Význam
$HEC$	%	Hole expansion coeficient = Koefficient zkoušky rozšiřováním otvoru
$D_0$	mm	teplota tavení
$D_N$	mm	napětí
$R_e$	MPa	mez kluzu
$R_M$	MPa	mez pevnosti
$E$	MPa	Youngův modul pružnosti v tahu
$\sigma$	Mpa	Napětí v materiálu
$\varepsilon$	-	deformace materiálu
$A$	%	tažnost
$F$	N	zatížení



# 1. Úvod a cíl diplomové práce

V současné době, kdy je kladen důraz na preciznost a dochvilnost, je třeba brát ohled především na životní prostředí a aktualizovat či vylepšovat současné, zaběhlé procesy. Může se jednat o samotnou výrobu v nejrůznějších odvětvích, či „jen“ o podklady pro různé numerické simulace, třeba i simulace budoucího reálného procesu tváření.

V mé práci se snažím najít pro konkrétně dané materiály jejich charakteristické koeficienty při deformaci, které lze poté použít jako výchozí či doporučené pro numerické simulaci či konkrétní nastavení parametrů procesu. Bude se jednat o stanovení mezní deformace při rozšiřování otvoru, budou vybrány jakosti materiálu a různé podmínky přípravy tohoto otvoru, aby bylo možné stanovit rozptyl možných hodnot mezních přetvoření pro různé vstupní podmínky.

Ve vstupním materiálu různých jakostí budou vyhotoveny otvory různými způsoby. Otvor bude mít průměr 10 mm a bude vystřižen, vyvrtán konvenčním vrtákem, vytvořen pomocí drátořezu a řezán pomocí laseru. Bude se brát v potaz technologie výroby a ty se budou mezi sebou porovnávat. Nástroj pro tuto zkoušku bude kuželový trn, který se bude do otvorů postupně vhnět.

Zkouška bude probíhat stejnou rychlostí pohybu nástroje, aby byly jednotlivé výstupy mezi sebou porovnatelné. Bude ukončena vznikem trhliny v okolí otvoru. Zkouška bude nahrávána dokumentovaná pomocí videosekvence, aby bylo možné i zpětně vyhodnotit změnu rastru, a i hrdla otvoru, ze kterého se poté stanoví potřebné hodnoty.

Cílem této práce je získat konkrétní hodnoty jako okrajové či vstupní, spojené se způsobem výroby polotovaru pro numerické simulace i pro reálnou výrobu.

V experimentální části budu stanovovat velikost deformace pro připravené otvory, které budou vyhotovené různými způsoby a pozorovat chování v jejich okolí. Na základě provedené analýzy pak bude stanoven parametr mezního přetvoření pro rozšiřování otvoru.

## 2. Tvářitelnost

Zavedení zkoušek tvářitelnosti je nezbytné ve strojírenském průmyslu z důvodu kvalitativní a produktivní výroby. Výsledky zkoušek nám pomáhají lépe predikovat chování materiálu v reálném procesu při tváření i při provozu, zamezují nečekaným výpadkům, omezují zmetkovitost, šetří peníze a v neposlední řadě i drahocenný čas. Výstupy z těchto zkoušek nám mohou sloužit jako vstupy, a to v podobě diagramů či koeficientů pro simulace numerické.

Drobné úskalí představuje rozmanitost výroby pro danou součást. Existuje celá řada možností, jak dosáhnout požadovaného výsledku tomu musejí odpovídat i zkoušky. Nelze vzít jednu jako univerzální, právě z důvodu specializace na konkrétní druh či způsob výroby.

Jedna z mnoha možností je tváření, kterému se budu v mé diplomové práci zabývat. Tváření se dělí z hlediska materiálového toku na *plošné a objemové* a dále lze tváření rozdělit dle *teploty při kterém probíhá, stupně dosažené deformace, velikost vnějších sil*. Tváření je ovlivněno materiálem a technologií výroby.

Podstatou tváření je změna polotovaru do požadovaného rozměru bez úběru třísky. Působí při něm poměrně veliké síly, které přetvořují materiál i jeho vnitřní strukturu. A se změnou struktury se pochopitelně mění i mechanické vlastnosti materiálu. Materiál se brání přetvoření, tato charakteristika se nazývá přetvárný odpor a roste spolu s deformací. Nad určitou hodnotou přetvárného odporu nelze dále tvářet, je vyčerpána veškerá plasticita a v materiálu se musí obnovit znovu schopnost tváření – např. teplotními procesy, typicky žíhání. Přetvárný odpor je materiálová konstanta, proto se každý materiál při tváření chová jinak.

Zkoušky lze ale použít i jako nástroj kontroly při výstupu součásti z výroby, kdy nám může zkouška podat informaci o materiálu (chemické složení a vliv mechanických vlastností) či zpětně kontrolovat výrobu, zdali byla dodržena stanovená technologická kázeň.

Zkoušky lze dělit dle

- Teploty – za tepla/ za studena
- Charakteru silového působení – statické/ dynamické
- Základní – tah, tlak, rázem v ohybu, krut
- Technologické – zkouška rozšiřováním otvoru, hloubením, tažení v kuželové tažnici

Výstupem může být např. diagram mezních přetvoření. Diagramy mohou sloužit např. ke stanovení bezpečné a nebezpečné oblasti při tváření či při provozu reálné součásti.

Při řešení této problematiky je snaha matematicky popsat reálný proces a co nejvíce se přiblížit realitě. Pro tento popis se využívá experimentálních zkoušek, kterými jsme schopni získat limitní diagramy pro daný materiál. Limitní diagram je souhrn popisů materiálu ať se jedná o rovnice rovnováhy sil, rovnice materiálového toku, plasticitu, konstitutivní rovnice či o omezující podmínky při dané zkoušce.

## 2.1 Zkouška tahem

Jedná se o základní zkoušku pro určení mechanických vlastností materiálu, ale z výsledků zkoušky jsme schopni hodnotit tvářitelnost materiálu.

Zkouška je prováděna dle příslušných norem, např. dle ČSN EN ISO 6892-1

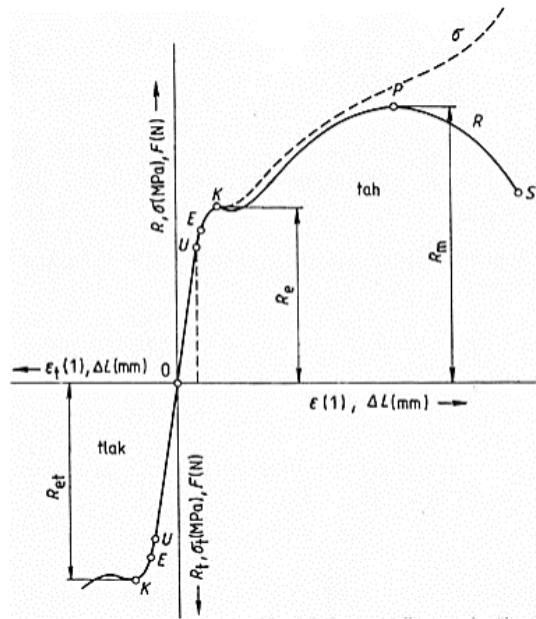
Zkouška spočívá v deformaci zkušební vzorku tahovým zatížením obvykle do porušení pro stanovení jedné nebo více mechanických vlastností zavedených v normě. Obvykle se zkouší při okolní teplotě v rozmezí 10 °C až 35 °C, v arbitrážních případech se zkouší při teplotách 23 °C ± 5 °C

Pro tenké plechy mají vzorky podobu plochých zkušebních tyčí. Ty se upnou do čelistí zkušebního stroje, poté se na vzorek nasadí průtahoměr, který slouží ke snímání prodloužení. Průběh zkoušky se zapisuje, buďto mechanicky nebo elektronicky, závislost působící síly  $F$  na prodloužení zkušební tyče [7,8]

Toto napětí je kladné v případě tahu, v případě tlaku je záporné (dané orientací působících sil). Zkoušky se provádí i v oblasti platnosti Hookeova zákona, z něhož rovněž vyplývá:

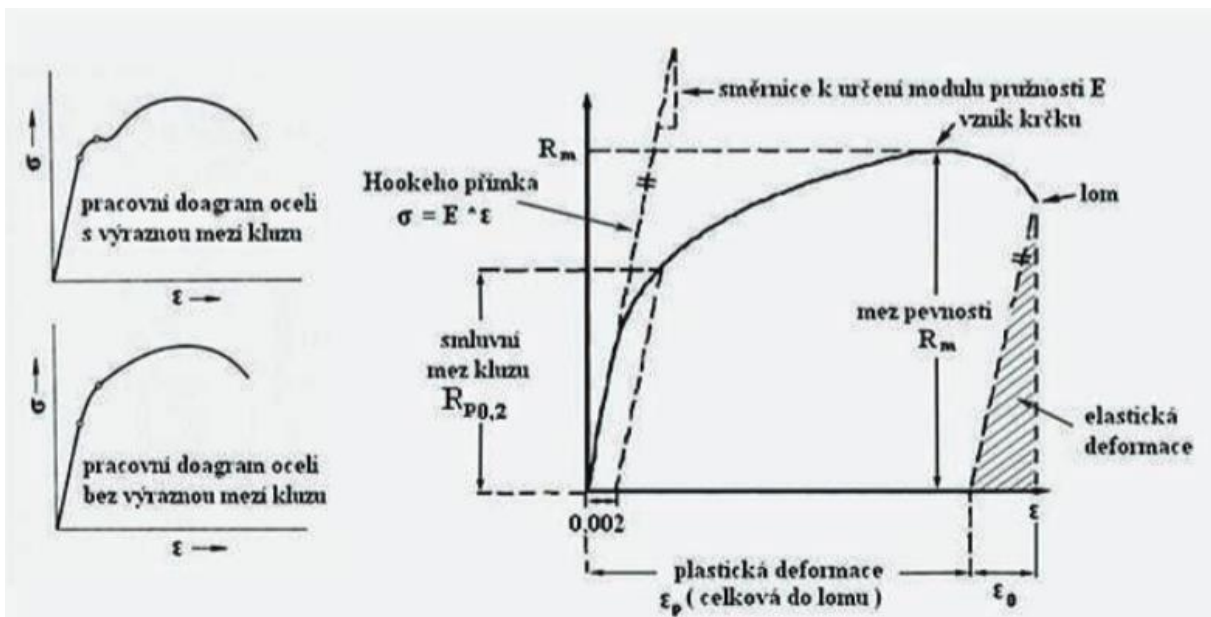
$$\sigma = \epsilon * E \rightarrow \sigma = \frac{F}{S}$$

Při tahových zkouškách se získává tahový diagram. Na svislé ose je vynesena zatěžující síla a na vodorovné prodloužení zkušební vzorku. Z diagramu lze získat např. mez úměrnosti, mez kluzu, mez pevnosti a okamžik porušení



Obrázek 1 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu [6]

Pro materiály s nevýraznou mezí kluzu (např. litiny) se zavádí tzv. **smluvní mez kluzu**, která se určí ze smluvního napětí. Pro smluvní napětí se počítá se smluvní silou, která způsobí deformaci např. 0,2%.



Obrázek 2 Rozdíl mezi výraznou a nevýraznou mezí kluzu [6]

Díky této zkoušce jsme schopni o materiálu získat základní důležité údaje:

- Mez kluzu – zatížení konstantní a stále dochází k prodlužování vzorku
- Mez pevnosti – odpovídající maximálnímu zatížení
- Tažnost – poměrné prodloužení vztahené k původní délce v %

- Poměrné prodloužení – poměrná délka vztažená k původní délce
- Kontrakce – porovnává se okamžitý průřez z původnímu v %
- Aktuální napětí – základní tahová rovnice, kdy vycházíme z aktuální síly na aktuální plochu vzorku

Touto zkouškou je vhodné zkoušet vzorky, u kterých je předpoklad, že budou v provozu vystavovány především tahu (tlaku) a to jsou různá táhla, napínáky, podpory aj. Ze zkoušky tahem lze vyhodnotit

homogenní tažnost  $A = \frac{L_K - L_0}{L_0} * 100$  [%]

kontrakci  $Z = \frac{S_0 - S_k}{S_0} * 100$  [%]

modul pružnosti v tahu E – tangenta úhlu křivky v tahovém diagramu

mez kluzu  $R_m$  – čím nižší hodnota, tím vyšší tvářitelnost

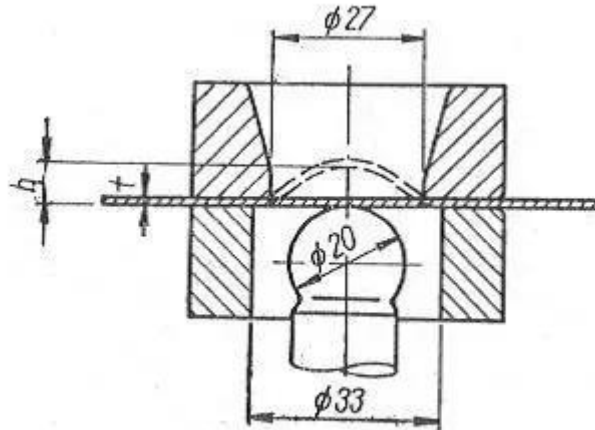
či pevnosti  $R_e$  – poměr meze kluzu ku pevnosti, čím nižší poměr, tím lepší tvářitelnost

## 2.2 Erichsenova zkouška hlubokotažnosti

Velmi rozšířená zkouška tvářitelnosti pro tenké plechy nebo pásy. Při zkoušce se vtlačuje kulovitý průtažník o průměru 20 mm do plechu upnutého přidržovačem na průtažnici, a to tak dlouho, dokud se na vytažené straně neobjeví trhlinka. Příslušné prohloubení  $h$  (v mm) je měřítkem hlubokotažnosti.

K výhodám zkoušky patří její jednoduchost, rychlost a nenáročnost na přípravu zkušebního plechu.

Naopak mezi nevýhody se řadí značný rozptyl výsledku v rámci zkoušky jedné jakosti plechu, nepodává informaci o anizotropii mechanických vlastností zkoušeného plechu. Při ručním zatěžování jsou naměřené výsledky do jisté míry ovlivněny obsluhou zařízení, protože hloubka  $h$  je závislá na rychlosti a plynulosti posuvu tažníku



Obrázek 3 Zkouška hlubokotažnosti plechů a pásů dle Erichsena [8]

### 2.2.1. Zásoba plasticity

Nejpoužívanější ukazatel tvářitelnosti. Definovaná jako velikost práce v [N\*mm] potřebné k přetvoření 1 mm<sup>3</sup> materiálu v oblasti rovnoměrné deformace. Zásobu plasticity lze určit i z tahové zkoušky, práce se počítá od dosažení meze kluzu až po maximální rovnoměrnou deformaci. Čím více materiál spotřebuje práce při tahové zkoušce, tím má lepší tvářitelnost při jiných druzích deformací. [7;9]

Vypočítá se ze vztahu:

$$ZP = \frac{A_P}{V_0} = k \cdot (R_m - R_k) \cdot \frac{A_H}{100} \left[ \frac{N \cdot mm}{mm^3} \right] \quad A_H = \frac{\Delta L_H}{L_0} \cdot 100 \left[ \% \right]$$

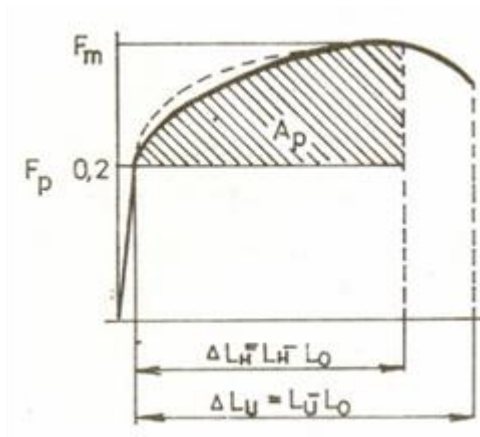
$k = \frac{3}{4}$  a  $R_k = R_{p0,2}$  – pro materiály s nevýraznou  $R_e$

$k = \frac{3}{4}$  a  $R_k = R_e$  – pro materiály s výraznou  $R_e$

$A_P$  je práce na vyčerpání zásoby plasticity [J]

$k$  – stupeň tažení

$A_H$  = rovnoměrná (homogenní) tažnost



Zásoba plasticity je daná jako rozdíl meze pevnosti a meze kluzu. Běžně se určuje i poměr mezi mezí kluzu a pevnosti. Čím nižší je tento poměr, tím je lepší tvářitelnost materiálu. [7]

Pro poměr  $R_{p0,2}/R_m$  z hlediska plastičnosti platí následující intervaly:

$R_{p0,2}/R_m < 0,55 \div 0,65 >$  má vynikající plastické vlastnosti

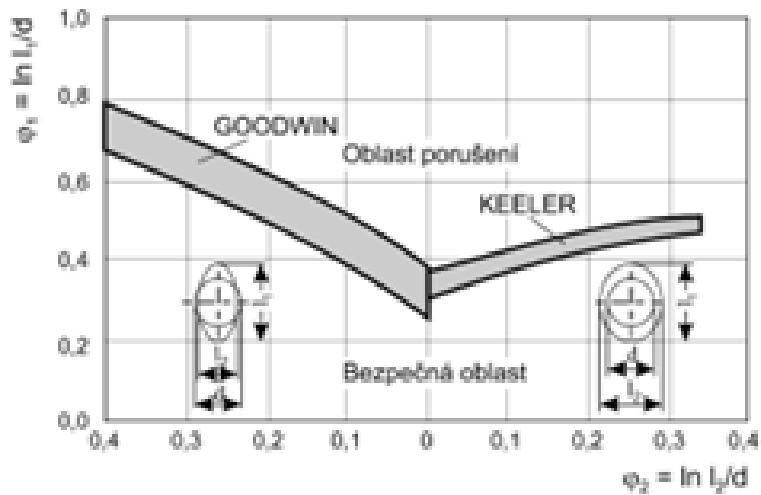
$R_{p0,2}/R_m < 0,65 \div 0,75 >$  má horší plastické vlastnosti

### 2.3. FLD diagramy

Tyto diagramy souvisejí s výše zmiňovanou zásobou plasticity. Znázorňují nám chování materiálu při zatěžování, aniž by došlo k iniciaci trhliny. Čím více je materiál tvárnější, tím vyšší zásobu plasticity má. Souvisí to s metalurgickými, technologickými a mechanickými vlastnostmi. [12]

V diagramu (Forming Limit Diagram) je znázorněna křivka (Forming Limit Curve), která jej rozděluje na bezpečnou část a na část, kde se může při tváření objevit porušení – nebezpečnou. Mezi těmito oblastmi se nachází tzv. šedá zóna, kde je riziko vzniku trhliny – nestabilní oblast.

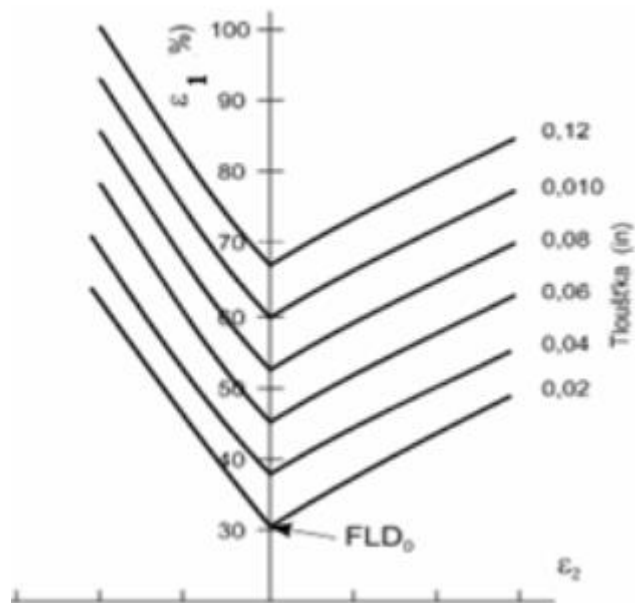
Keeler původně předpokládal obě napětí kladná, kdy tomu tak ve skutečnosti ale být nemusí. Proto jej Goodwin doplnil o svou teorii, že hlavní přetvoření je kladné a vedlejší záporné. Po složení obou předpokladů vznikl Keeler-Goodwinův limitní diagram (obr. 4).



Obrázek 4 Keeler-Goodwinův limitvní diagram [13]

Tvar křivek připomíná písmeno V, pro plechové součásti je v podstatě podobný, jen se křivka v diagramu posouvá výše či níže, tvar ovlivňuje velikost hlavního a vedlejšího napětí. Postavení je ovlivněno

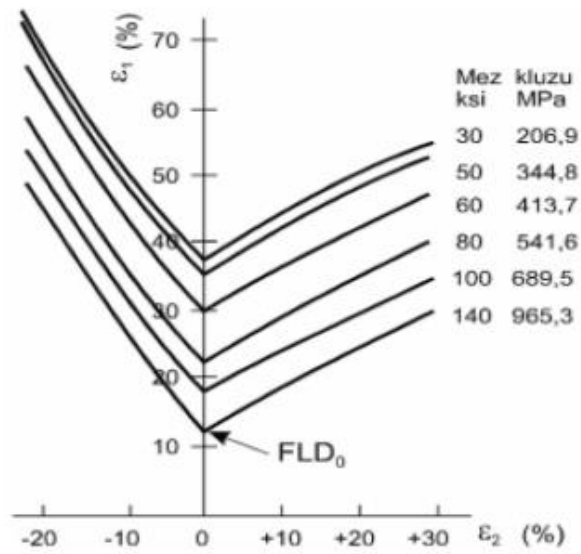
- Tloušťkou plechu



Obrázek 5 Závislost polohy FLC na tloušťce materiálu [13]

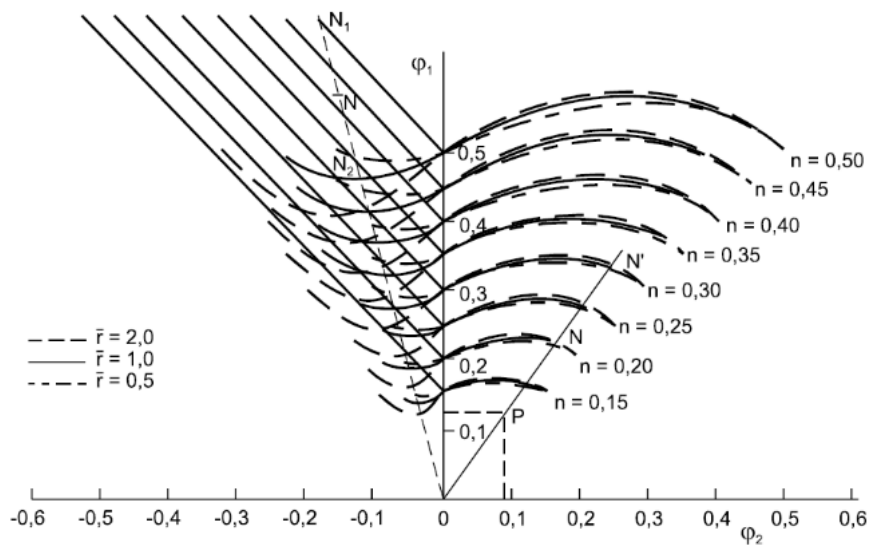
- Mezí kluzu  $R_e$





Obrázek 6 Závislost polohy FLC na mezi kluzu [13]

Čím je křivka postavena výše, tím větší je bezpečná oblast při tváření.



Obrázek 7 Závislost polohy FLC na  $r$  a  $n$  [13]

### 2.3 Numerické simulace

Numerické simulace mohou být velmi nápomocné při navrhování reálného tvářecího procesu. Správně nasimulovaný proces podá informace o tvářecím procesu, geometrii příslušných nástrojů a v neposlední řadě ušetří i nemalé finanční prostředky. Výpočetních SW existuje celá řada, ale cílem práce je získat pro ně vstupní či okrajová data, nikoliv jejich obecný teoretický funkční popis.

Pro jejich správnou funkci je zapotřebí zadat správných vstupů. Jako hlavní vstup je brán materiál, který popisují deformačně – např. křivka zpevnění. Dále je nutné charakterizovat, kdy v materiálu při tváření začíná docházet k plastické deformaci (změna vratné na nevratnou). Tento okamžik se nazývá jako podmínka plasticity a k němu je třeba stanovit i podmínku porušení = porušení materiálu.

Běžně se tato podmínka dělá křivkou mezního přetvoření (FLC), ale tato křivka je platná pro plochu materiálu. Na hraně se materiál chová jinak a zpevnění této hrany může měnit tyto podmínky, kdy se trhлина začne šířit. K tomu má pomoci právě tato zkouška. Simulační SW mají způsoby, jak tam tyto vstupy zadat, např. se vyskytuje v materiálové kartě. V této kartě je i hodnota, která určuje velikost deformace, při jejímž překročení, se z hrany materiálu rozběhne trhлина, ale ve většině případů je tato hodnota nedefinována. Tato hodnota bývá výrazně menší, než je hodnota deformace v diagramu FLD, a je závislá na způsobu výroby přípravy hrany.

### 3. Mezní deformace na hraně materiálu

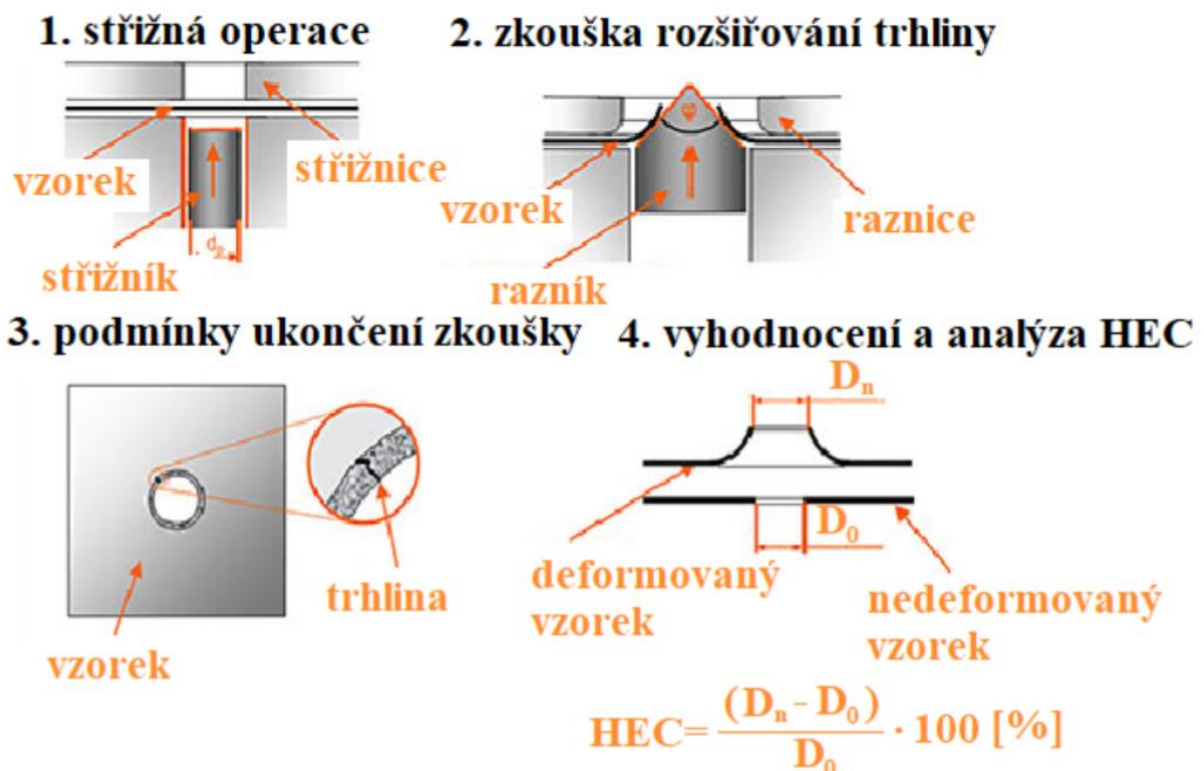
Zkouška rozšíření otvoru (Hole Expanzion Test, dále jen HET) je popsána v normě ISO 16630 a v současné době je jedinou celosvětově rozšířenou normovanou metodou pro stanovení citlivostní trhliny na hraně materiálu. Vznikají i jiné zkoušky, které mají tuto problematiku také řešit, jako Diablo test, ale je zde velká řada věcí, které nejsou z hlediska podmínek zkoušení definované.

Do zkušební vzorku je vytvořen různými způsoby otvor o stanoveném průměru a následně je rozšiřován razníkem s úhlem kužele 60° nebo kulovým razníkem R 50. Dle normy má otvor definovaný průměr 10 mm.

Jako výsledná hodnota tvářítečnosti se bere poměr průměrů otvorů, tzn. poměr deformovaného otvoru ku původnímu otvoru.

Zkouška je ukončena, když začíná vznikat trhlina v celé tloušťce v okolí místa zkušební otvoru. Test je samozřejmě závislý na rychlosti vnímání obsluhy zařízení a na ní závisí i výsledně získané hodnoty. Z tohoto důvodu by se mělo měření několikrát opakovat, aby se získal co nejpresnější výsledek a ten posloužil pro budoucí zkoušky.

Krom tohoto standardizovaného testu existuje ještě řada dalších metod, které byly vyvinuty za účelem kvantifikace citlivosti hrany vůči trhlíně. [1]



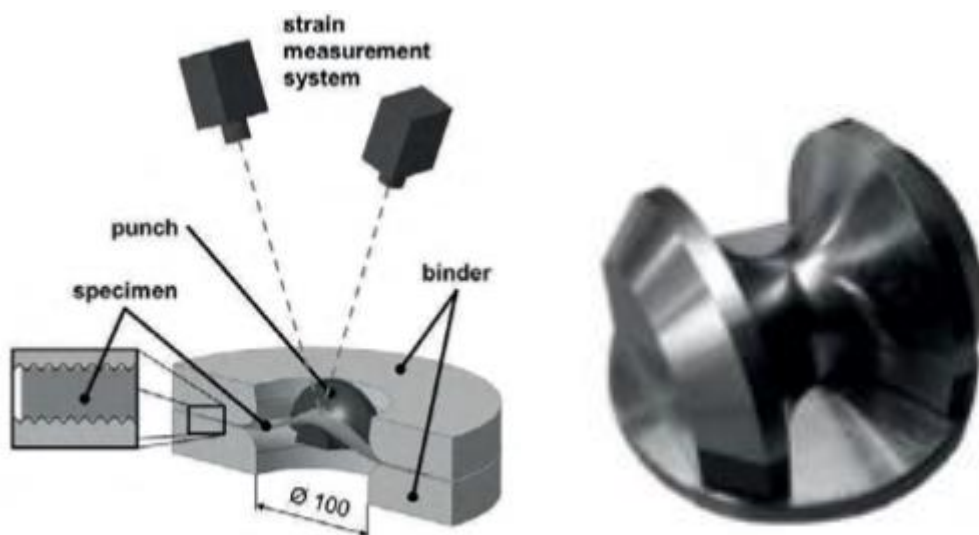
Obrázek 8 Princip a vyhodnocení zkoušky rozšiřováním otvoru [12]

### 3.1 Diabolo test

Pomocí tohoto testu je možné získat charakteristiku daného materiálu, konkrétně chování a vznik citlivostní trhliny na hraně materiálu. Obr. 11 znázorňuje základní nastavení testu. Vstupní materiál je vytvořen stříháním – tvářením za studena, kdy dochází ke zpevnění střížné hrany. Geometrie nástroje způsobuje silně lokalizované napětí na okraji vzorku, které vede k iniciaci trhliny. Toto přetvoření lze měřit instalovaným systémem měření přetvoření ARAMIS. Velikost deformace této oblasti vzorku je srovnatelná s dráhou deformace při zkoušce tahem. [14]

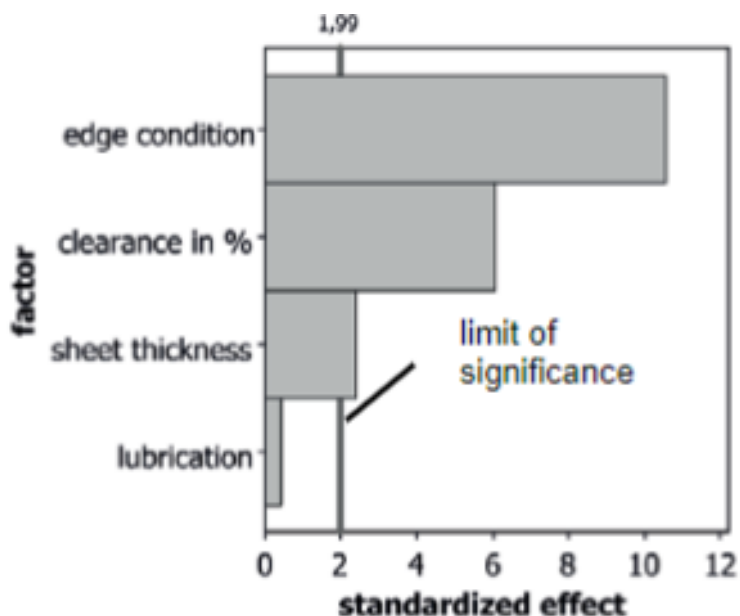
Tato zkouška se provádí na hydraulickém lise osazeným speciálním razníkem. Při zkoušce se používá opět optické vyhodnocování spojené se záznamem zkoušky. Nástroj (diabol) má speciální geometrii (viz. Obr. 9), díky níž se deformace hromadí ve velmi malé oblasti na hraně zkušebního tělesa. Výsledky z této zkoušky jsou široce přijímané pro zefektivnění procesu. Jako proměnná odezvy byla použita deformace před začátkem zužování materiálu, kvůli charakteristice citlivosti trhlín na okraji. Z výsledků zkoušky lze vyhodnotit procesní parametry [15]

- Plech válcovaný za tepla či za studena
- Tloušťka plechu
- Řezná vůle
- Stav nástrojů
- Mazání



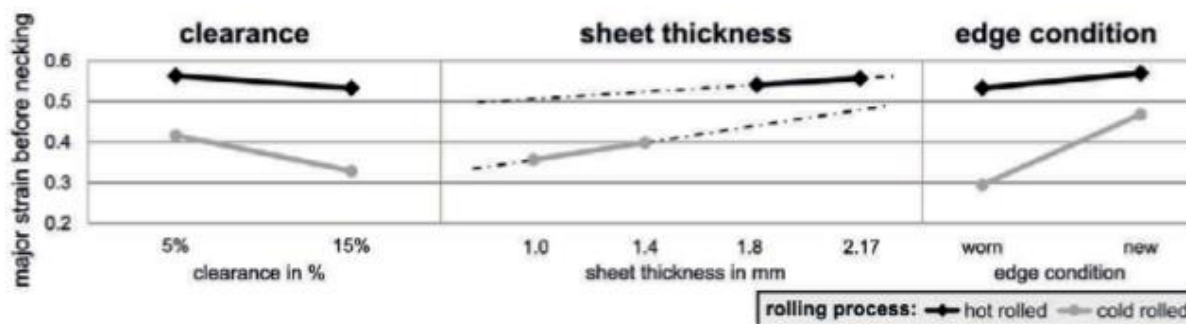
Obrázek 9 Základní nastavení pro Diabolo test, geometrie razníku [14,15]

Paretův graf, kde jsou výsledky vykresleny standardizovaně a jsou vyneseny ve svislém pruhovém grafu v sestupném pořadí, je zobrazen na obr 11. Standardizovaný efekt znamená, že efekt je v podstatě dělen směrodatnou odchylkou. V grafu (obr. 6) svislá čára označuje hladinu 2% významnosti.



Obrázek 10 Paretův diagram pro Diablo test [14]

Silně převyšující tuto hranici jsou pouze 2 vlivy, a to stav nástrojů spolu se střížnou vůlí. Vliv tloušťky materiálu je minimální a mazání při procesu je zanedbatelné.



Obrázek 11 Porovnání materiálů tvářených za tepla a za studena při Diablo testu [15]

## 3.2 Zkouška podle Nakajimi

Jedná se opět o rozšiřovací zkoušku, kdy je do zkušebního materiálu o rozměrech 200x200 mm vytvořen otvor o průměru 20 mm a je vtlačován polokulový razník s rádiusem R 50. Rychlost rozšiřování je dle normy ISO 16630 1 mm/s nebo menší. Směr děrování musí odpovídat směru tvárnosti, nelze tudíž vystřihnout plech z jedné strany a z opačné jej rozšiřovat. Mělo by to za následek zkreslení experimentu, a tedy neplatnost získaných dat. Zkouška je opět vizuálně vyhodnocována, tudíž by se mělo měření alespoň 3x opakovat.

Při Nakajima testu s kulovým razníkem vzniká trhlinka rychleji než při použití kuželového razníku a měla by se použít korekce s ohledem na rychlost šíření trhliny. O této korekci se zmiňuje [2]

U této zkoušky si lze pomoci měrné sítě, jež se nanese před samotným testem a díky němu lze použít pro měření kamerový systém ARAMIS. A pokud se použije i druhá kamera, lze vyhodnocovat ve 3D, jelikož deformace nejsou pouze v rovině.

Výsledkem je opět poměr vzniklého průměru ku původnímu. [2;3]

## 3.3 Zkouška podle Kobeho


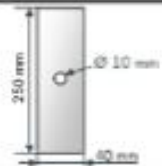





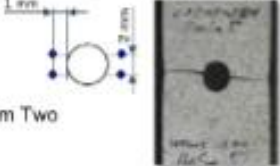
Pro Kobeho tahovou zkoušku se používá vzorek podobný tahové zkoušce, který má rozměr 250x40 mm<sup>2</sup>. Do zkušebního tělesa je vytvořen otvor. Parametry a podmínky zkoušky jsou zobrazeny na Obrázku 9.

Rychlost pro zkoušku je 10 mm/ min a zkouška je zastavena, jakmile se začne tvořit v okolí otvoru trhlinka. Otvor koncentruje napětí, protože je zde materiál v podstatě nehomogenní. Na povrchu lze opět užít stochastického vzoru pro snazší a přesnější vyhodnocení zkoušky, systémem ARAMIS. Již se ale nejedná i vizuální, nýbrž virtuální vyhodnocování charakteristik.

Virtuální délka se začne stanovovat z původní délky o hodnotě 2 mm a 1 mm od kraje vzorku. Orientována je shodně s průběhem zkoušky, tzn. rovnoběžně s čelistmi stroje a rovnoběžně s delší, podélnou osou vzorku.

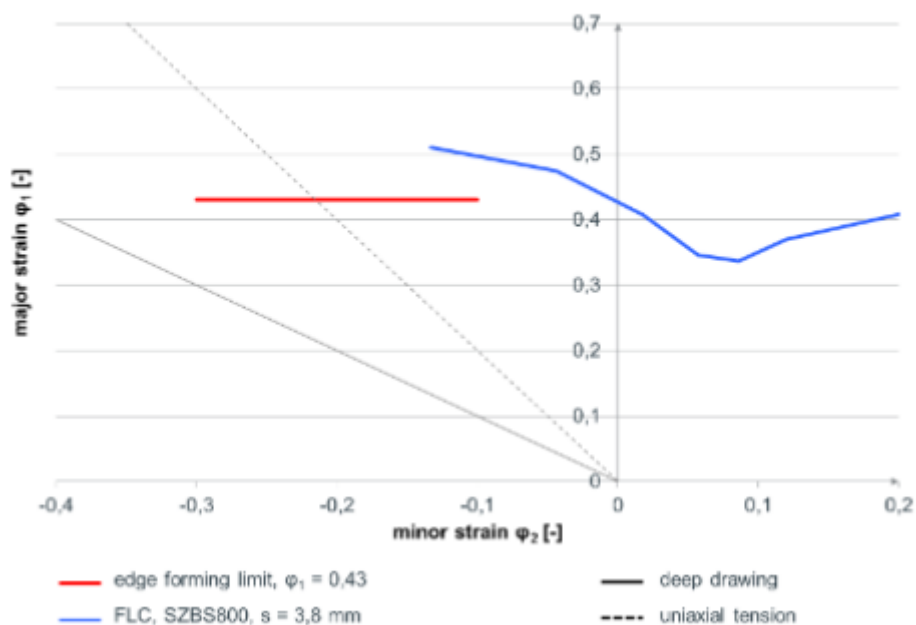
Vyhodnocuje se poměr konečné délky při vzniku trhliny ku původní nedeformované délce.

Systém ARAMIS jak u Kobeho, tak u Nakajimi zkoušku výrazně omezuje lidský faktor a měření tak může být daleko přesnější. [2;5]

Hole Expansion with Nakajima-Punch	Kobe Hole Tensile
<ul style="list-style-type: none"> <li>Sample Size 200 mm x 200 mm</li> <li>Shear Cutting Ø 20 mm punch</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sample Size 40 mm x 250 mm</li> <li>Shear Cutting Ø 10 mm punch</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Forming Ø 100 mm Nakajima Punch according to ISO 12004-2</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Forming Tensile Test Constant Velocity: 10 mm/min</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Turn-Off Criterion Visual Cut through Sheet Thickness</li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Turn-Off Criterion Automatic Shutoff at 5%-Load-Drop</li> </ul> 
<ul style="list-style-type: none"> <li>Analysis <ul style="list-style-type: none"> <li>Determination of Hole Expansion Ratio</li> <li>Strain Analysis and Automatic Determination of Crack-Moment</li> </ul> </li> </ul> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>Analysis <ul style="list-style-type: none"> <li>Determination of Major Strain by Measurement of Displacement from Two Virtual Points</li> </ul> </li> </ul> 

Obrázek 12 Rozdíl jednotlivých zkoušek lámavosti hran při rozšiřování otvoru [1]

Výsledná charakteristika je pak zanesena do FLD diagramu jako doplňková informace, kde může zásadně upravit tvářecí operace. Zanesse se jakási hranice, při které se tvoří trhliny na hranách a je snaha se tomuto úseku vyhnout. Na příkladném obrázku 10 je hodnota stanovena na 0,43.



Obrázek 13 FLD s tvářecími operacemi, doplněný o limitní hodnotu praskání na hraně [4]

### 3.4 Optické systémy pro vyhodnocování deformací při HET

Optický systém může pozorovat velikost deformace pouze v případě, kdy je díl snímán alespoň ze 2 směrů. Systém ze zachycených a zpracovaných snímků získá 3D souřadnice – informace o jednotlivých bodech měrné sítě. Ze souřadnic konkrétních elementů je možné určit jejich vzájemný posuv, tudíž i velikost deformace. Na základě změřených deformací lze zjistit polohu bodů v rámci FLD, hodnotu hlavního a vedlejšího napětí a aktuální tloušťku plechu v konkrétním místě viz rovnice. Rovněž je nesporná výhoda ta, že si záznam lze prohlédnout i později, ze záznamu např. pro ověření správnosti měření [9;16]

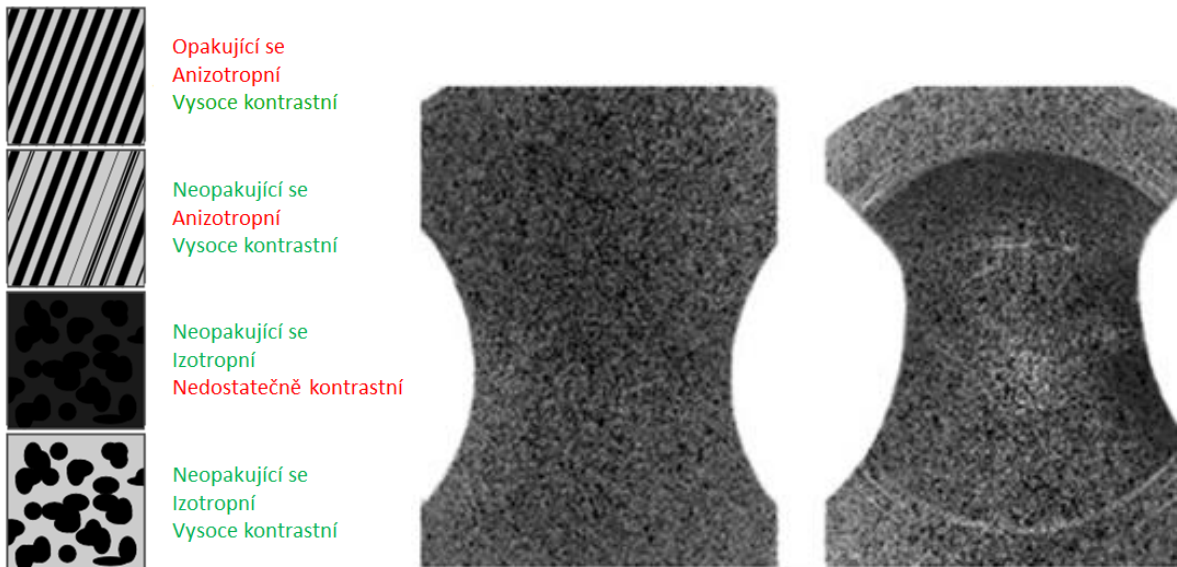
$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 = 0$$

Na poli optických systémů sloužících k vyhodnocování deformací po tváření se používají především 2 systémy – ARGUS a ARAMIS. ARGUS využívá deterministický typ sítě (elektrolytické leptání, či značení laserem), deformace vyhodnocuje poté, co je plech vyjmut z nástroje, nelze jej pozorovat průběhu tváření. Systém ARAMIS osahuje 2 kamery, povrch vzorku je opatřen stochastickým typem sítě (nanášeno např. barvou ve spreji) a je nutné vidět vzorek po celou dobu zkoušky. Z průběhu zkoušky se vytvoří videosekvence, která se později vyhodnocuje. Výhoda těchto systémů spočívá v jejich mobilitě a rozsahu měření deformace. Lze s nimi ověřovat chování materiálů, různě materiály podrobovat zkoušení, predikovat či optimalizovat proces atd.

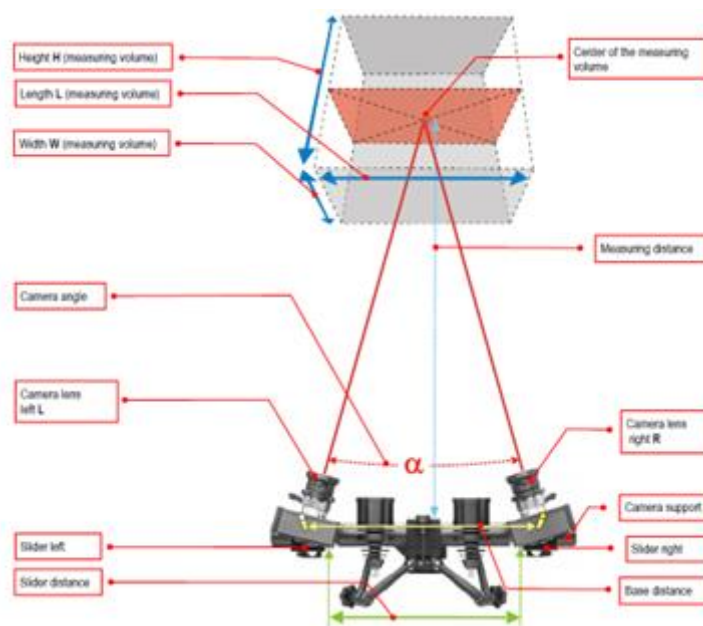
#### 3.4.1. ARAMIS

Před samotným měřením se systémem ARAMIS je nezbytné povrch sledovaného dílce opatřit vhodný nástřik (obr. 14, kterým je vytvořena deformační síť pro sledování deformace. Pro tvorbu měrné sítě platí pravidla, aby tato síť byla po celou dobu zkoušky pozorovatelná, jedná se především o zajištění soudružnosti s podkladovým materiálem, je třeba, aby byla matná kvůli odrazům světla, tvořena 2 barevnými a dostatečně kontrastními odstíny. Pozorovaný předmět, je v průběhu deformace pomocí principu DIC snímán 2 CCD kamerami. Systém ARAMIS umí vyhodnotit i dynamické děje – stárnutí a tečení a má možnost měření deformace objektu v průběhu procesu (např. zkouška tahem) Měření mohou být díly s velikostí od  $10^{-4}$  do  $10^2$ m, rozsah měřené deformace se pohybuje od 0,05% do stovek %. [16]





brázek 14 Charakteristický povrch součásti pro snímání systémem ARAMIS [16]

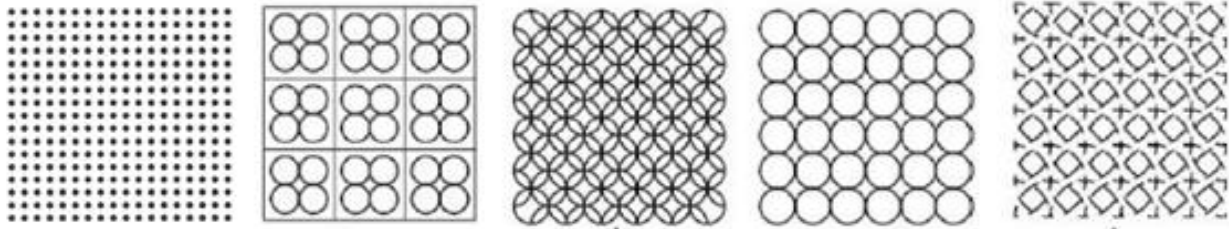


Obrázek 15 Schéma měřicího systému ARAMIS [16]

### 3.4.1. ARGUS

Jedná se o optický bezkontaktní systém, který používá k vyhodnocování reálných vzorků snímky o vysokém rozlišení. Obdobně jako u systému ARAMIS je nutné před tvářením na povrch dílce nanést rastr. Zde je to síť měřících (deformačních) bodů. Hustota a průměr se volí dle potřeby a velikosti sledovaného dílu. Na součást se síť vytváří buď gravírováním na laseru či elektrochemickým leptáním, to bývá nejčastější řešení.

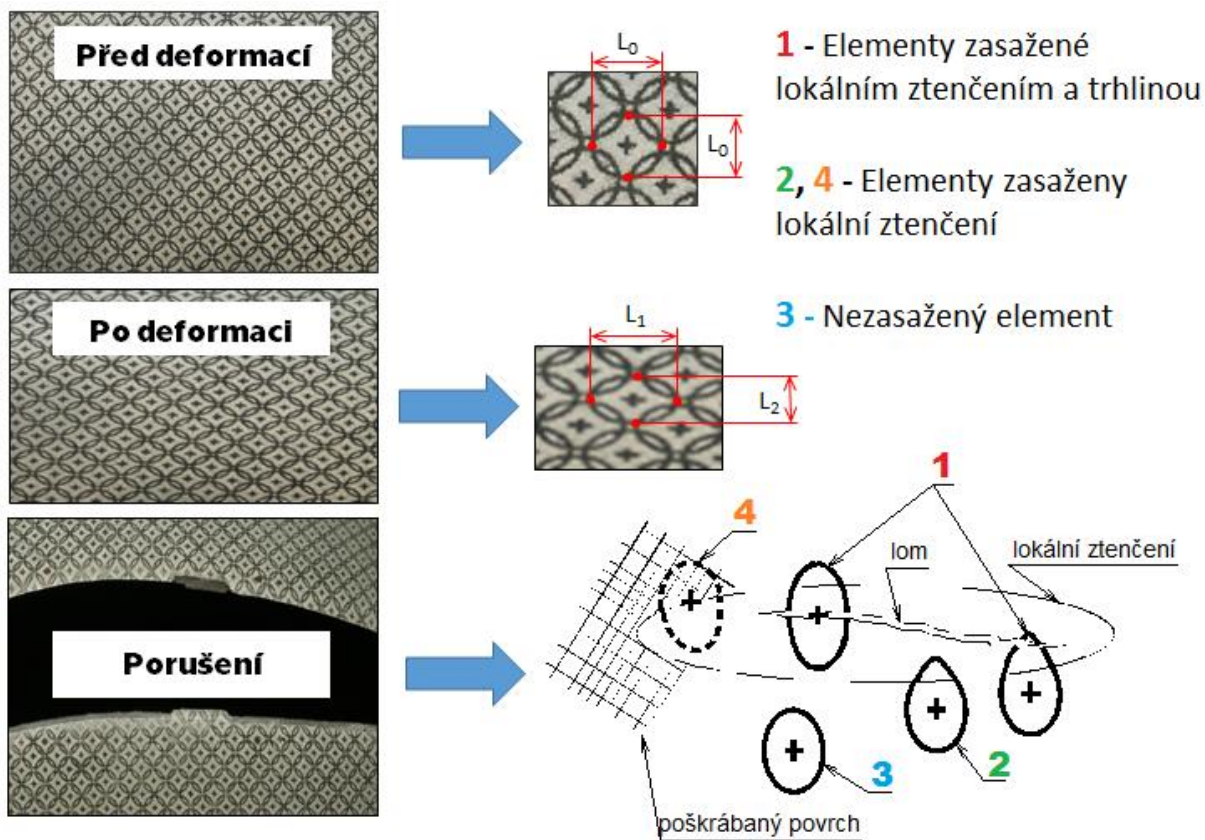
Velikost a hustota sítě je před zkouškou známá, po provedení tvářecí operace se síť zdeformuje a zkontroluje se posun jednotlivých měřicích bodů vůči sobě. Z praxe se osvědčila síť s kružnicovými elementy – po protažení se z ní stává elipsa. Velikost měřených dílů může být v jednotkách mm i jednotkách m. Této velikosti je třeba uzpůsobit síť, rozsah měřené deformace se pohybuje od 0,5 % do stovek %.



Obrázek 16 Kružnicový rastr pro vyhodnocení tváření systémem ARGUS [17]

Systém umožňuje výsledky ze zkoušky automaticky vyhodnotit a vyhodnotit ve vztahu s FLC křivkou, ze které vplyne jasná charakteristika při průběhu tvářecích operací. ARGUS je schopen verifikovat výsledky získané výpočtovou simulací tváření při návrhu tvářecího nástroje, a tak optimalizovat návrhové výpočty. [17]

Síť se nanáší na celý plech najednou, velikost nanesené plochy je závislá např. na velikosti fólie pro vytváření měrné sítě. Je třeba, aby poté nebyla při dělení materiálu tato síť narušena – např. při vytváření přístřihů z velkého polotovaru. Rovněž je zásadní velikost jednotlivých elementů – malé elementy zhoršují přesnost celého měření a velké elementy nejsou schopny zaznamenat rozdíly mezi jednotlivými elementy v oblasti s koncentrovanou velikou deformací v malé ploše.



Obrázek 17 Síť pro systém ARGUS před a po tvářecí operaci [19]

Rastrovou síť pro oba výše zmiňované systémy lze samozřejmě pozorovat i jinými způsoby, např. mikroskopem nebo při dostatečné velikosti i ručně s pomocí příslušných měrek. Výhodou optických systému je přesnost spojená se záznamem v reálném čase s možností pozdějšího přehrání.

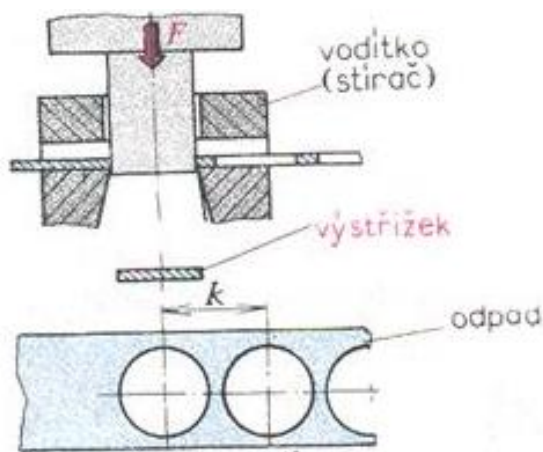
## 4. Technologie výroby otvorů zkušebních vzorků pro zkoušku rozšiřování otvoru

V této kapitole se bude jednat o popis jednotlivých technologií, které byly použity na výrobu jednotlivých otvorů do zkušebních vzorků. Výstupem práce bude nejen porovnání materiálů mezi sebou, ale také i to, jestli má způsob výroby na HET význam.

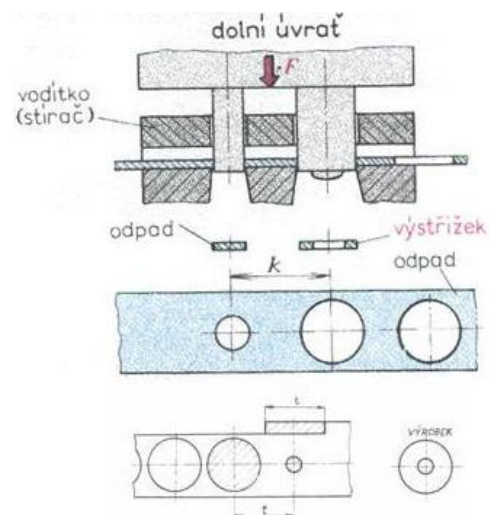
### 4.1 Stříhání

Stříhání řadíme převážně do plošného tváření za studena, lze ale stříhat i objemově, a také i za tepla (např. ingoty). Jedná se o jednu z nejpčetnějších operací tváření, jelikož se používá k přípravě polotovaru pro další operace, pomocné operace i finální operace. Při jednom zdvihu nástroje se současně nebo postupně odděluje materiál od výchozího polotovaru. Nástroj má ostré hrany, v materiálu se vytvoří smyková napětí vyšší, než je dovolená mez stříhaného materiálu a dojde k porušení.

Nástroj pro stříhání se nazývá stříhadlo. To může mít různá provedení, ale názvosloví se stále uchovává – střížník a střížnice. Střížník i střížnice mají ostré hrany, břity, které se pohybují proti sobě (střížník je upnut v beranu stroje, střížnice na pracovním stole stroje). Materiál se nejprve mezi břity pěchuje, po vyčerpání schopnosti deformace materiálu proti stříhu se začnou tvořit jemné trhlinky a následně dochází k odlomení od původního materiálu – vzniká výstřížek. Stříhání je jedinou tvářecí operací, kdy požadujeme destrukci materiálu, ve výpočtech se počítá se smykovými napětími [9;18].



Obrázek 18 Jednoduchý střížný nástroj [18]

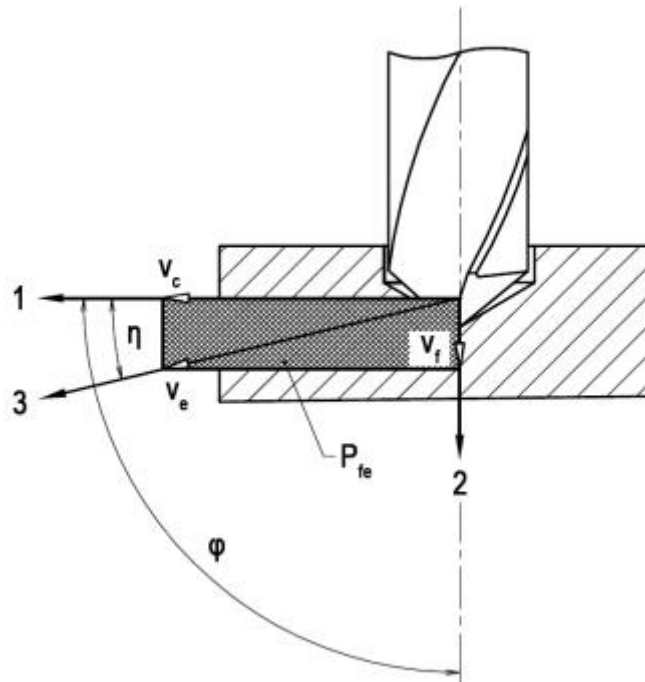


Obrázek 19 Postupový střížný nástroj [18]

Pomocí technologie stříhání byly zhotoveny všechny vzorky o rozměrech 100x100 mm a do první skupiny materiálů byl otvor zhotoven právě stříháním.

## 4.2. Vrtání

Vrtání je metoda třískového obrábění materiálu za pomoci nástroje – vrtáku, který vykonává hlavní a vedlejší řezný pohyb (rotace + posuv). Touto metodou se vytváří vnitřní rotační otvory, ať průchozí či neprůchozí.



Obrázek 20 Schéma vrtání [20]

Vrtání je realizovatelné i na soustruhu, kde hlavní řezný pohyb koná obrobek a vedlejší řezný pohyb nástroj. Stejně tomu tak je při vrtání hlubokých děr, kdy obrobek rotuje kolem nástroje.

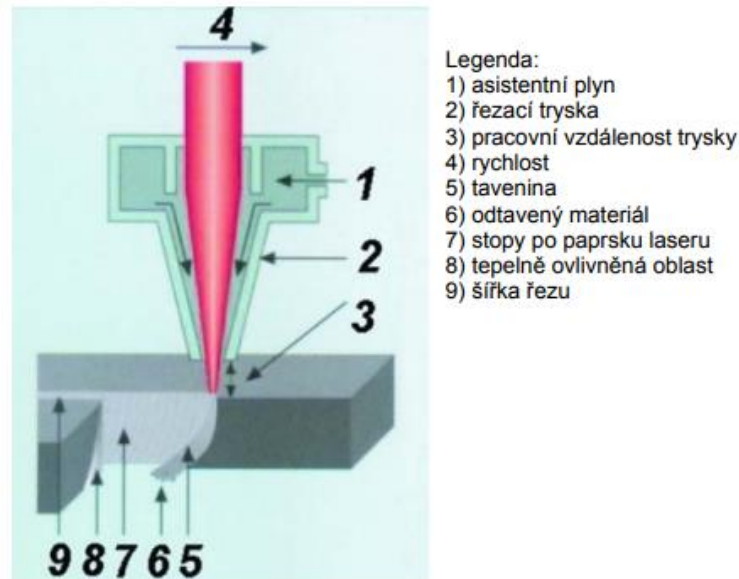
## 4.3. Obrábění pomocí laseru

Laser pracuje na principu indukované emise, tedy vynuceného záření. Jednotlivé částice si předávají energii, vzniklý světelný paprsek je koherentní, uspořádaný a míří do jednoho bodu.

Jde o optický zdroj elektromagnetického záření – tedy zdroj jistého druhu světla, který má svá specifika a od běžného světla se liší v několika bodech:

- je monochromatické - má jen jednu vlnovou délku, na rozdíl od bílého světla jej lze soustředit do jednoho bodu (u bílého světla má každá barva při rozložení své vlastní ohnisko)

- má malou divergenci (rozbíhavost)  $\Theta$  – ta je charakterizovaná poloviční velikostí vrcholového úhlu kužele
- je koherentní (uspořádané – má jedinou fázi a frekvenci).
- má vysokou výstupní intenzitu
- tepelně ovlivněná oblast je minimální – struktura materiálu při hranici řezu



Obrázek 21 Schéma laseru [21]

Lasery se dále dělí dle aktivního prostředí

- CO<sub>2</sub> lasery (80 % He, N<sub>2</sub> 10 %, CO<sub>2</sub> až 10%)
- Nd-YAG – pevný krystal Y3Al5O12

Pro řezání kovových materiálů se nejvíce používají CO<sub>2</sub> lasery s kontinuálním během a středním výkonem (až 6 kW). Je třeba při procesu odvádět méně tepla oproti vláknovému, ale je třeba zajistit dostatečně silný zdroj pro buzení. Lasery o takovém výkonu zvládnou běžně řezat materiály do tl. 8 mm, ale záleží na řezaném materiálu. Nízkolegovaná ocel při řezání vytváří lehce odstranitelné oxidy, naopak špatně připravená plocha pro řezání (zoxidovaná) je velmi tvrdá a výrazně ovlivňuje kvalitu řezu.

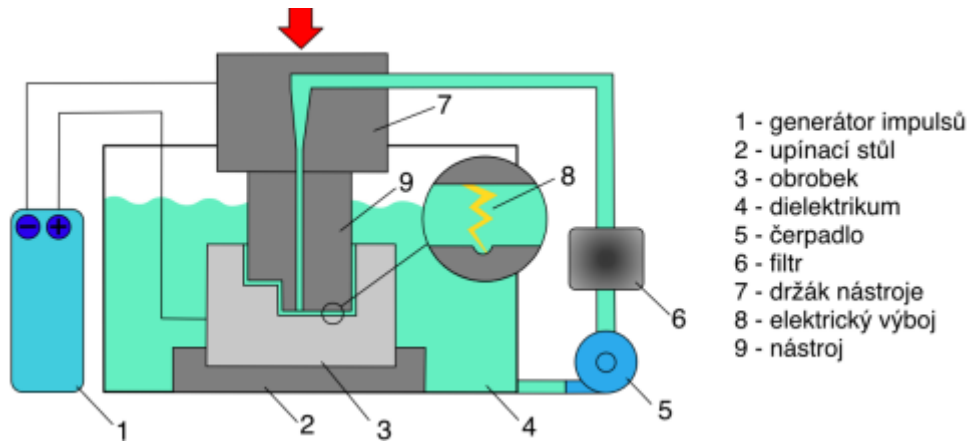
U povrchově upravených plechů nastává také komplikace. Dochází zde totiž k poškození ochranné vrstvy při odvodu tepla z místa řezu, buď odpařením povlaku u pozinkovaných plechů, nebo poškozením vazeb mezi materiálem a povlakem u barvených plechů, ale tento problém lze řešit použitím ochranného plynu.

Při řezání korozivzdorných ocelí je směrodatný obsah chromu v materiálu. Chrom vytváří neoxidovanou vrstvu, která brání procesu řezání. Snižuje se rychlost řezání i maximální možná tloušťka plechu (oproti nízkolegované oceli to může být až polovina) [21;22]

#### 4.4. Elektroerozivní obrábění

Jedná se o nekonvenční technologii obrábění, rovněž známá jako elektrojiskrové obrábění. Jak již z názvu napovídá, k úběru se využívá el. výbojů, nikoliv mechanické práce nástroje. Obrábění je založeno na fyzických a chemických principech.

Úběr materiálu se koná za pomoci elektrického výboje, který nastává mezi elektrodou (zapojena jako anoda) a obráběným materiálem (zapojen jako katoda). Aby proces fungoval, musí být anoda i katoda zaplavena v dielektriku, což je kapalina s vysokým elektrickým odporem. Správně zvoleným dielektrikem lze zvýšit produktivitu spolu s životností nástroje.



Obrázek 22 Schéma elektroerozivního obrábění [23]

Princip spočívá v přiblížení elektrody na velmi malou vzdálenost 5-100  $\mu\text{m}$ , jelikož při této vzdálenosti vzniká el. výboj. v tomto místě je přivedeno napětí a jakmile je přítomno napětí, vznikne mezi katodou a anodou i elektrické pole. Napětí je zpočátku maximální a s rostoucím časem klesá, jelikož vzrůstá proud a teplota. Je to v důsledku uvolněných elektronů z anody, ze kterých vznikají kladně i záporně nabitě ionty. Ionty se urychlí až do takového stavu, že dielektrikum ve velmi malé vrstvě ionizuje a vznikne tzv. plazmový kanál. Při přerušení přívodu proudu prudce klesne teplota, vzniklá plynová bublina v dielektriku imploduje a nově přitékající dielektrikum vyplavuje obráběný materiál. Materiál se rovněž prudce ochladí a odplavuje se ve formě miniaturních kuliček, po kterých zůstává na obrobku stopa. Proces se opakuje a tím dochází k obrábění materiálu.

V závislosti na nastavených parametrech obrábění dosahuje teplota výboje až 10 000  $^{\circ}\text{C}$ . Při této teplotě dochází k intenzivnímu tavení povrchu obráběného materiálu.

## **Dílčí závěr**

Způsob přípravy otvoru do polotovaru určitým způsobem ovlivňuje vlastnosti děleného materiálu a vnáší na hranu a její blízké okolí napětí, které poté ovlivňuje způsob šíření trhliny od hrany.

V další části práce je možné se podívat na to, která metoda má největší ovlivnění, která metoda je snadno použitelná ve výrobě, jaké jsou problémy při vrtání tenkého plechu, jaká je celková náročnost a s tím spojená velmi nízká produktivita.

Pomocí těchto technologií budou připraveny otvory do zkušebního materiálu a budeme ověřovat jeho chování.



## 5. Příprava zkušebních vzorků

Před samotnou zkouškou rozšiřováním otvoru bylo nutné připravit zkušební tělesa. Všechny zkušební vzorky mají mít dle normy rozměry 100x100 mm (rozměry v rámci mm, pro zkoušku vliv chyby zanedbatelný), důležitý je avšak otvor o průměru 10 mm v jejich geometrickém středu, tzn. dle předpisu normy nesmí být otvor k žádnému okraji blíže než 45 mm.

Plech byly připraveny technologií stříhání, na ručních dílenských nůžkách. Otvory do plechů poté byly zhotoveny následujícími technologiemi:

Stříhání – předpoklad zpevnění hrany

Vrtání – problematika vrtání do tenkého plechu

Elektroerozivní obrábění – předpoklad nejlepšího povrchu

Řezání pomocí laseru – otázka vneseného tepla při hraně



*Obrázek 23 Příprava zkušebních vzorků [-]*

Na zkoušky byly vybrány následující materiály:

**DC06 +ZE50/50** – nelegovaná, nízkouhlíková jakostní ocel válcovaná za studena. Ocel používaná k tváření za studena (tažení, lisování), lakování aj. ZE50/50 značí o elektrolytický zinek, jehož je na každé straně 5 mikrometrů, označení pojednává v desetinásobku

Tabulka 1 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DC05 [24,25]

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]
0,06	0,35	0,025	0,025	270-330	180

**DX56Z100-MCO** – nízkouhlíková, nízce legovaná ocel určená ke tváření za studena. Označení Z100 udává množství zinku, jedná se o žárový zinek kdy na 1 m<sup>2</sup> je 100g zinkové vrstvy. Žárově zinkované plechy mají vysokou kvalitu povrchu, používají se v automobilovém průmyslu na vnitřní i vnější díly karosérie. Jediné úskalí nastává při výrobě, kdy musí být dodržena technologická kázeň, a to ve smyslu čistoty zinkovací lázně. Postupně se totiž kontaminuje, znečišťuje se i povrch plechu a tím se zhoršuje kvalita povrchu.

Tabulka 2 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DX56 [26]

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Ti [%]	Si [%]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]
0,12	0,6	0,1	0,045	0,3	0,5	115-234	154

**DP 500** – patří do 1. generace pokročilých vysokopevnostních ocelí s omezenou tvářitelností. Je to žárově zinkovaná nízkolegovaná dvoufázová ocel. Struktura se skládá z tažné feritické matrice a tvrdé martenzitické fáze (10÷40 %). Kombinací těchto dvou struktur vznikne pevný, tažný a dobře svařitelný materiál. DP500 je díky vysoké absorpční kapacitě a únavové pevnosti běžně používanou ocelí pro konstrukční části. Další výhodou je Bake Hardening efekt (viz pozn.), který má ocel DP500 vyšší než HX180BD. Efektivním řešením pro zvýšení pevnosti oceli je zjemňování struktury, které je zároveň možné bez navyšování nákladů na legování. Používá se na výrobu vnitřních konstrukčních částí karosérie automobilů [27]

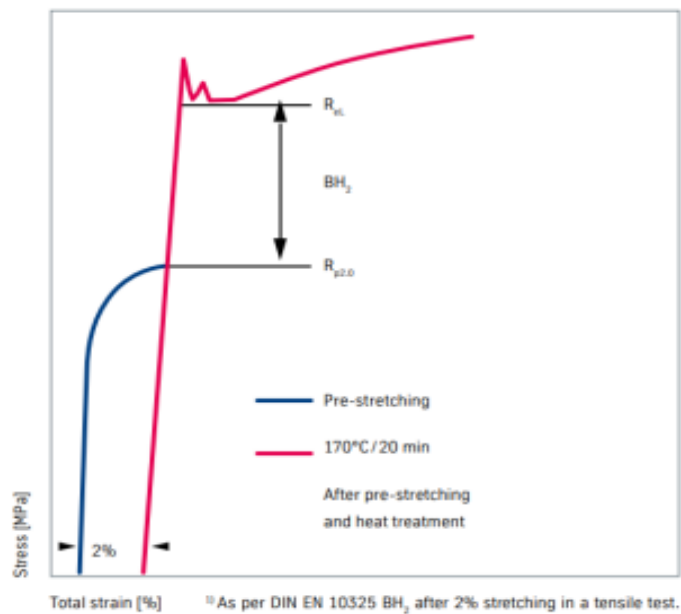
Tabulka 3 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli DP 500 [27]

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Si [%]	Cu [%]	Ti+Nb [%]	Cr+Mo [%]
0,14	1,8	0,05	0,01	0,015-1	0,5	0,2	0,15	1

R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A [%]
490-600	290-380	24

Pozn. Ocel, kterou lze zpevnit při výrobě speciálním výrobním postupem = Bake Hardenable. Základní mikrostruktura oceli je feritická a ocel má před procesem nízkou mez kluzu, zpravidla do 250 MPa a vysokou plasticitu. Postup tkví v lakovaném povrchu dílce, při lisování se lak vypaluje a dochází k deformačně tepelnému stárnutí materiálu, které přináší zvýšení meze kluzu (př. na 320 MPa).

Výsledná ocel má tedy vyšší mez kluzu, dovolené zatížení a zvýšenou odolnost proti škrábancům, rýhám a otlacení. Je zde problém v zeslabování vylisků a v odpružení, protože nárůst pevnosti je závislý na velikosti deformace, která není v celém vylisku stejná. [27;28]



Obrázek 24 Porovnání meze kluzu pro ocel zpevněnou vypalováním povrchu při lisování [27]

**HX 180 BDZ100** – řadí se do kategorie vysokopevnostních ocelí (HSS). Je to zároveň zinkovaná plně uklidněná nízkouhlíková ocel s feritickou základní mikrostrukturou. Při lisování se vypaluje lak a dochází tak k deformačně tepelnému stárnutí, což má za následek zvýšení meze kluzu (bake hardening efekt viz kapitola 4.4.2). Pro své vlastnosti je používána u vnějších viditelných částí karoserie, jako je střecha, vnější dveře či kapota [27;28;29]

Tabulka 4 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli HX180 [28]

C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Al [%]	Si [%]	Cu [%]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A [%]
0,6	0,7	0,06	0,025	0,015	0,05	0,2	290-370	180-240	34

**Korozivzdorná ocel 17 420** – austenitická chromniklová korozivzdorná ocel, je tvárná za studena – hluboké tažení, ohraňování a zakružování, svařitelná. Odolná jak vodě, párá, vzdušné vlhkosti, tak slabým organických a anorganickým kyselinám. Pracovní namáhání do 400 °C

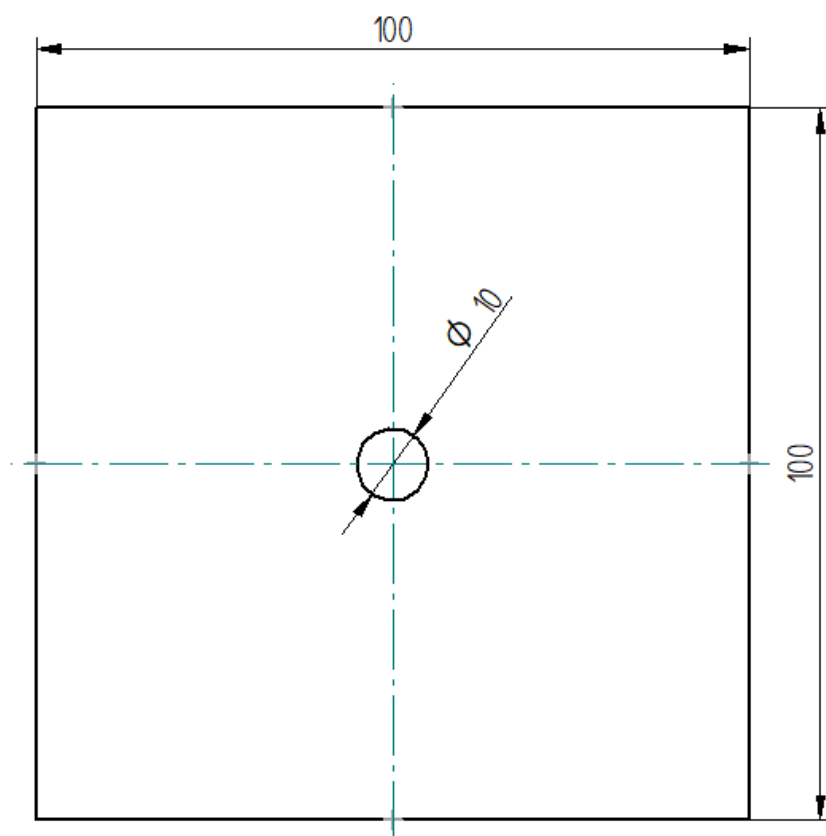
U tlouštěk nad 6 mm je při svařování riziko mezikrystalické koroze i s dodatečným tepelným zpracováním.

Při obrábění je třeba z důvodu sklonu ke zpevňování pracovat s ostrými nástroji z vysoce legované rychlořezné oceli, tvrdokovu, nebo karbidových slitin.

*Tabulka 5 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 240 [31]*

C [%]	Cr [%]	Ni [%]	N [%]	R <sub>m</sub> [MPa]	R <sub>e</sub> [MPa]	A [%]
0,07	17-19,5	8-10,5	0,11	600	210	45

Uplatnění nachází ve strojírenském a nukleárním průmyslu, v architektuře, v dopravních zařízeních, v potravinářském průmyslu, ve farmaceutickém a kosmetickém průmyslu, při stavbě chemických přístrojů a motorových vozidel, výrobě chirurgických nástrojů, sanitárních zařízení, předmětů a přístrojů pro domácnost a uměleckých předmětů. [30]



Obrázek 25 Rozměry zkušebních vzorků

Pro usnadnění značení vzorků při experimentu byl zaveden číslicový systém, a to následujícím způsobem:

ABC

A – označuje číslo materiálu

1	2	3	4	5	6
DX57	DP500	DC06	DX56	HX180	Korozivzdorná ocel

B - označuje způsob výroby otvoru

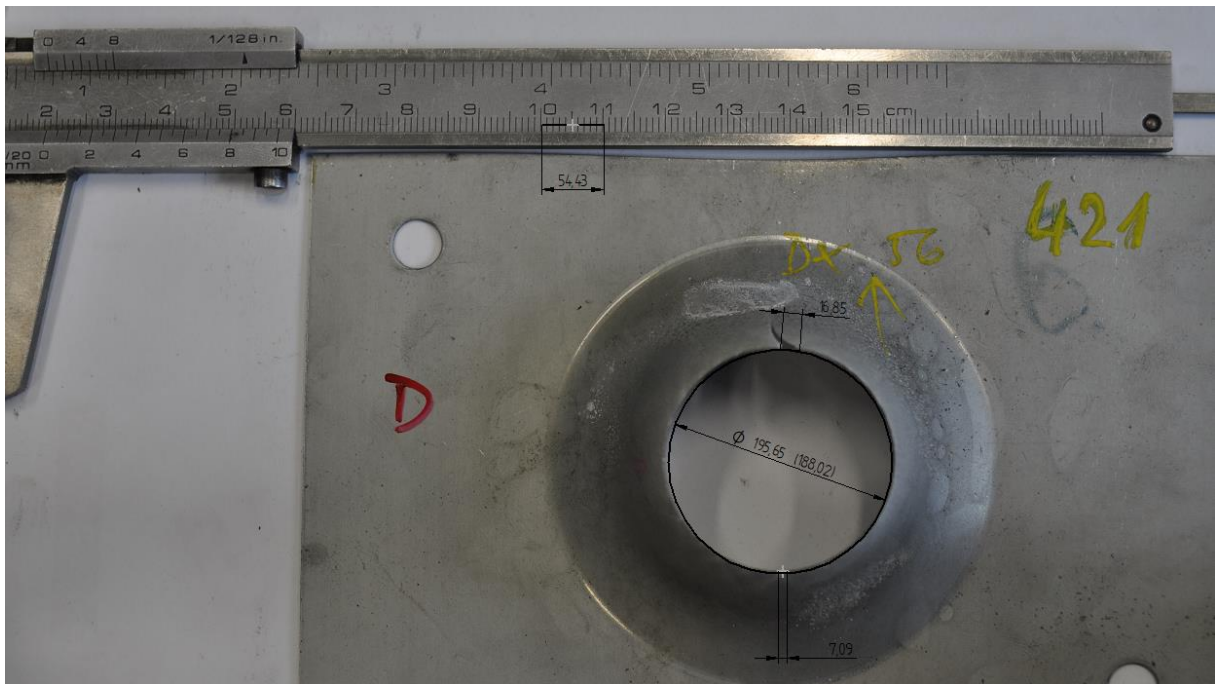
1	2	3	4
laser	elektro eroze	střih	vrtání

C – pořadové číslo vzorku

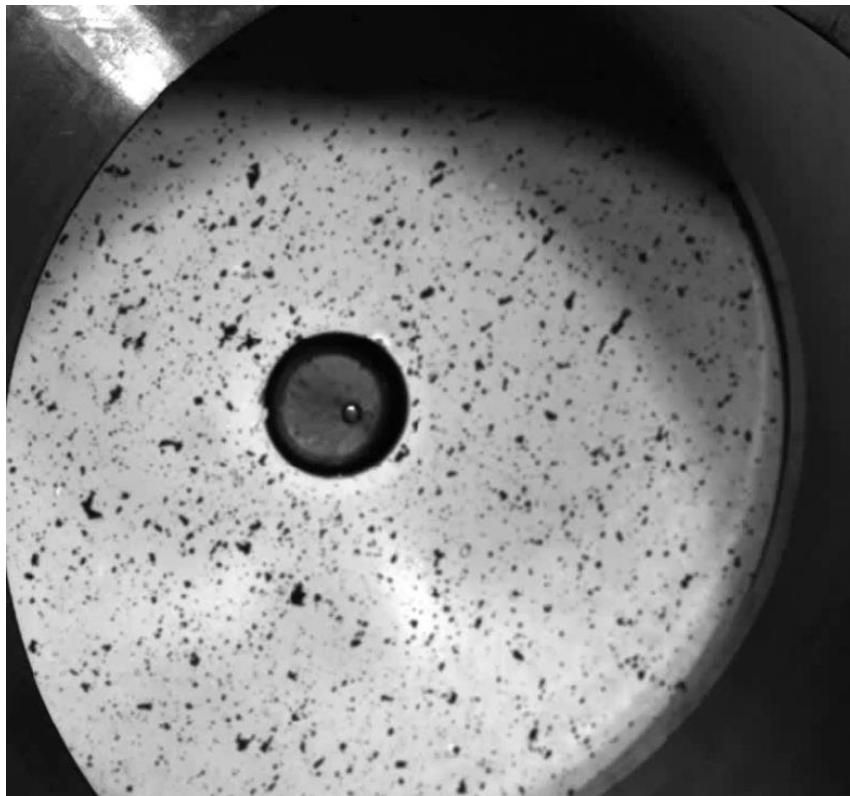
Takže např. označení 221 znamená, že se jedná o vzorek materiálu DP500 s otvorem zhotoveným pomocí elektro eroze a první vzorek v pořadí

### Popis a vyhodnocení zkoušky

- Plech se zhotoveným otvorem a změřeným průměrem je založen a vystředěn v nástroji
- Následně dojde k zavření přidržovače, který má za cíl zabránit pohybu plechu v nástroji při zkoušce
- Zkouška je prováděna rovnoměrnou rychlostí 1 mm/sec při pokojové teplotě a standardním atmosférickém tlaku
- Po celou dobu zkoušky je vizuálně sledována deformace v okolí otvoru, v okamžiku vzniku trhliny je zkouška ukončena a vzorek vyjmut z nástroje
- Po vyjmutí je změřen konečný průměr otvoru
- Každý vzorek je po zkoušce nafocen pro další analýzu, k jak velkému rozšíření trhliny došlo, resp. předpokládá se od obvodu otvoru odečíst velikost trhlín(y). Tzn. bere se v potaz jako menší průměr otvoru, zmenšený právě o délku vzniklé trhliny
- Ke zdokumentovanému snímku bylo přiloženo posuvné měřítko pro definování měřítka
- Takto zhotovený snímek byl vložen do CAD systému, kde byla ručně provedena analýza obrazu. Hranou obrazu otvoru byla proložena kružnice, ze které se zjistil průměr, a od které se poté odečetla délka trhliny.



Obrázek 26 Rozměrové vyhodnocení a stanovení HEC [-]



Obrázek 27 Zkušební vzorek a uprostřed plech deformující tažník [-]

Vyhodnocení se provádí ze změřených konečných průměrů v korelaci s dokumentací a výpočetním SW. Původní průměr je změřen, výsledný průměr je dopočítán, např. kombinací posuvného měřítka a CAD systému.

Z experimentu se poté dle následujícího vzorce přepočte koeficient HEC, který je rovněž zahrnut v tabulce.

$$HEC = \frac{(D_n - D_o)}{D_o} * 100 [\%] [1; 32]$$

Stejný koeficient HEC vyjde i metodou výpočtu přes průměry, kdy se může od obvodu pouze odečíst délka trhliny.

$D_n$  je průměr otvoru po HET

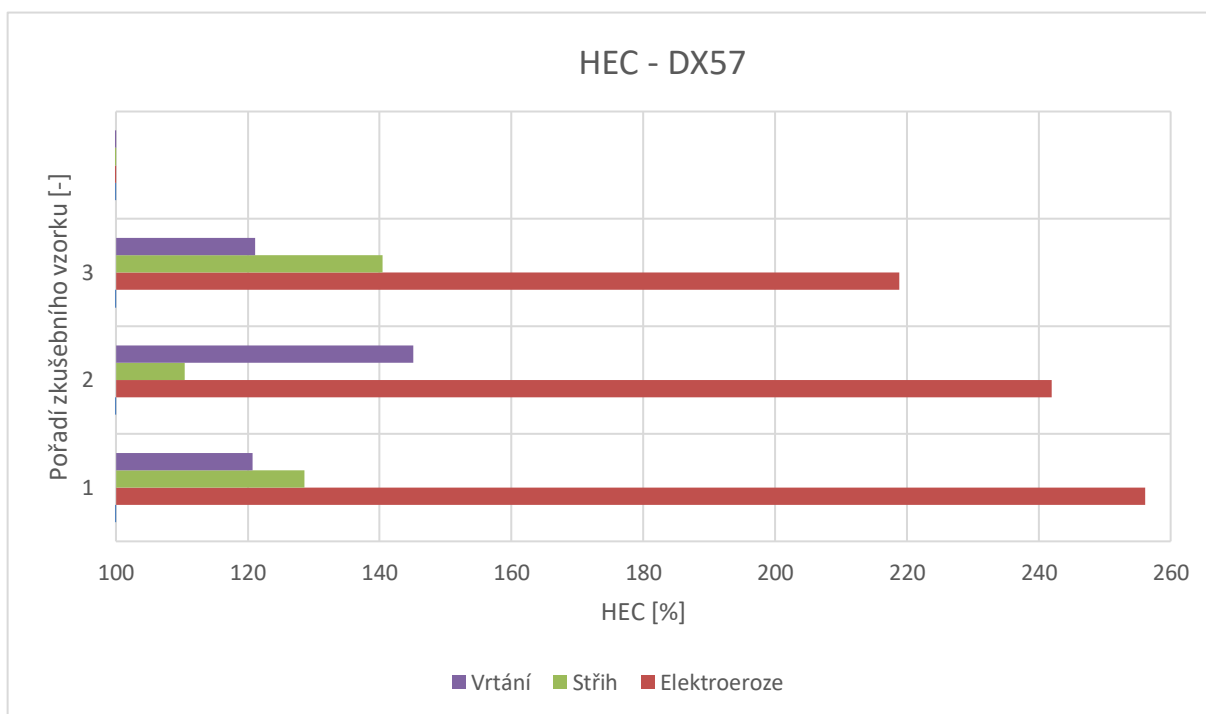
$D_o$  původní průměr před HET



## 5.1. HET pro materiál DX 57

Tabulka 6 Výsledky experimentu pro materiál DX 57, tl. 0,7 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1	Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,95		10,05	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		35,61	35,61	22,70	22,75	22,64	22,18
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		33,03		22,75		22,18	
	HEC [%]		-	<b>256,1</b>		<b>128,6</b>		<b>120,7</b>
2.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,95		10,12	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		34,20	34,2	20,92	20,94	24,80	24,80
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		32,05		20,94		24,80	
	HEC [%]		-	<b>242,0</b>		<b>110,4</b>		<b>145,1</b>
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,96		10,06	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		31,9	31,88	24,21	23,94	22,28	22,24
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		31,88		23,94		22,24	
	HEC [%]		-	<b>218,8</b>		<b>140,4</b>		<b>121,1</b>



Obrázek 28 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DX57

### Komentář k výsledkům

Z grafu je patrné, že koeficient HEC vychází nejvyšší pro vzorky s otvory vyrobené elektroerozivním obráběním. Je to z důvodu hladkého řezu, bez indikátorů trhlin na hraně a zvlnění, jako je tomu např. v případě mechanického stříhání. Vrtání a stříh jsou srovnatelné, stříhání zpevňuje střížnou hranu, odbírá plasticitu a vrtání do slabých plechů je špatně realizovatelné z důvodu tečení materiálu před vrtákem a tvorby otřepů.

Výsledky (zejména pro elektroerozivně zhotovené vzorky) se mírně liší, a to z důvodu velkých deformací a s tím spojená chyba při měření – otvor není kružnicovitého, ale spíše elipsovitého tvaru. Rovněž pro SW odečítání se vlivem změny výšky mění měřítko a tyto faktory podporují vznik rozdílného měření koncového průměru.

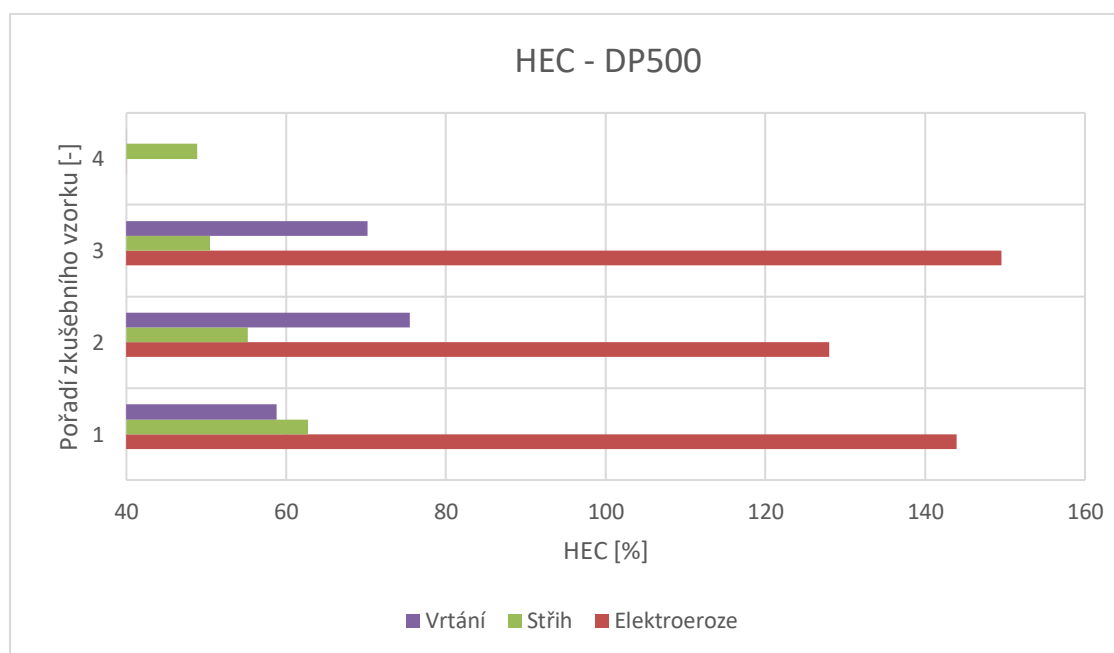
Materiál DX57 je vhodný k tváření, vykazuje to i koeficient HEC.

## 5.2. HET pro materiál DP500

Tabulka 7 Výsledky experimentu pro materiál DP500, tl. 0,60 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1	Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,99		10,03	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		24,39	24,39	16,07	16,25	16,20	15,93
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		20,83		16,25		15,93	
	HEC [%]		-	<b>143,9</b>		<b>62,7</b>		<b>58,8</b>
2.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,96		10,03	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		22,80	22,80	15,60	15,49	17,71	17,60
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		21,89		15,49		17,60	
	HEC [%]		-	<b>128,0</b>		<b>55,2</b>		<b>75,5</b>
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/	10,00		9,97		10,02	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená		24,95	24,95	15,05	15,00	17,27	17,05
	D <sub>n</sub> [mm] změřená		23,38		15,00		17,05	
	HEC [%]		-	<b>149,5</b>		<b>50,5</b>		<b>70,2</b>

4.	D <sub>o</sub> [mm]	/	/	9,99		/
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			14,88	14,88	
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			15,46		
	HEC [%]			-	-	



Obrázek 29 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DP500

### Komentář k výsledkům

Materiál DP500 je méně vhodný k tváření, vykazuje to i koeficient HEC, který je přibližně poloviční oproti koeficientu u předchozího materiálu – DX57. Materiálová charakteristika je obdobná, nejvyšší koeficient HEC pro elektroerozivní obrábění. V prvním případě dokonce koeficient HEC u vrtání je nižší než při stříhání – možná příčina špatně naostřený vrták, házivost.

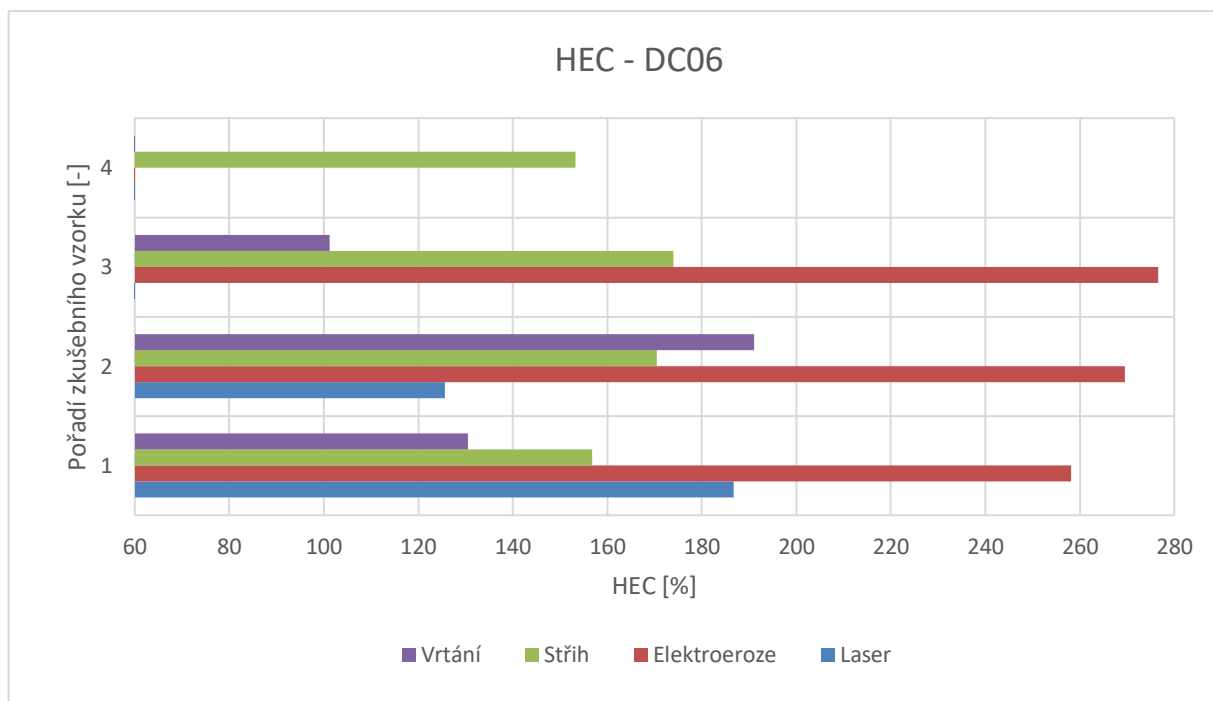
Projevuje se tu opět rozdíl měření při SW a pomocí posuvky – při prvním vzorku je patrný největší rozdíl, a to z důvodu velkého počtu trhlin na obvodu hrany a elipsovitého tvaru otvoru po zkoušce – nepřesnost ručního měření.

### 5.3. HET pro materiál DC06

Tabulka 8 Výsledky experimentu pro materiál DC06, tl. 0,7 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1		Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	10,15		10,00		10,05		10,05	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	31,01	29,10	35,81	35,81	25,81	25,81	23,17	23,17
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	29,10		32,96		25,97		22,55	
	HEC [%]	<b>186,7</b>		<b>258,1</b>		<b>156,8</b>		<b>130,5</b>	
2.	D <sub>o</sub> [mm]	10,16		10,00		9,99		10,02	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	22,92	22,92	36,96	36,96	27,03	27,03	29,17	29,17
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	22,11		36,37		26,88		28,73	
	HEC [%]	<b>125,6</b>		<b>269,6</b>		<b>170,5</b>		<b>191,1</b>	
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/		10,00		10,00		10,02	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			37,66	37,66	27,40	27,40	20,16	20,16
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			35,06		27,53		19,65	
	HEC [%]			-		<b>276,6</b>		<b>174,0</b>	

4.	D <sub>o</sub> [mm]	/		9,95		/	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			25,20	25,20		
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			26,23			
	HEC [%]			-	-		153,3



Obrázek 30 Koefficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DC06

## Komentář k výsledkům

Materiál DC06 má ze zatím zkoušených materiálu nejlepší předpoklady pro hluboké tažení. Nově do grafu přibyl laser, kdy první vzorek předčil vrtání a stříhání, ve druhém případě byl ale nevhodným na posledním místě. Pro obecnější popis laseru by to chtělo mít více vzorků zhotovených pomocí laseru, které budou v dalších materiálech.

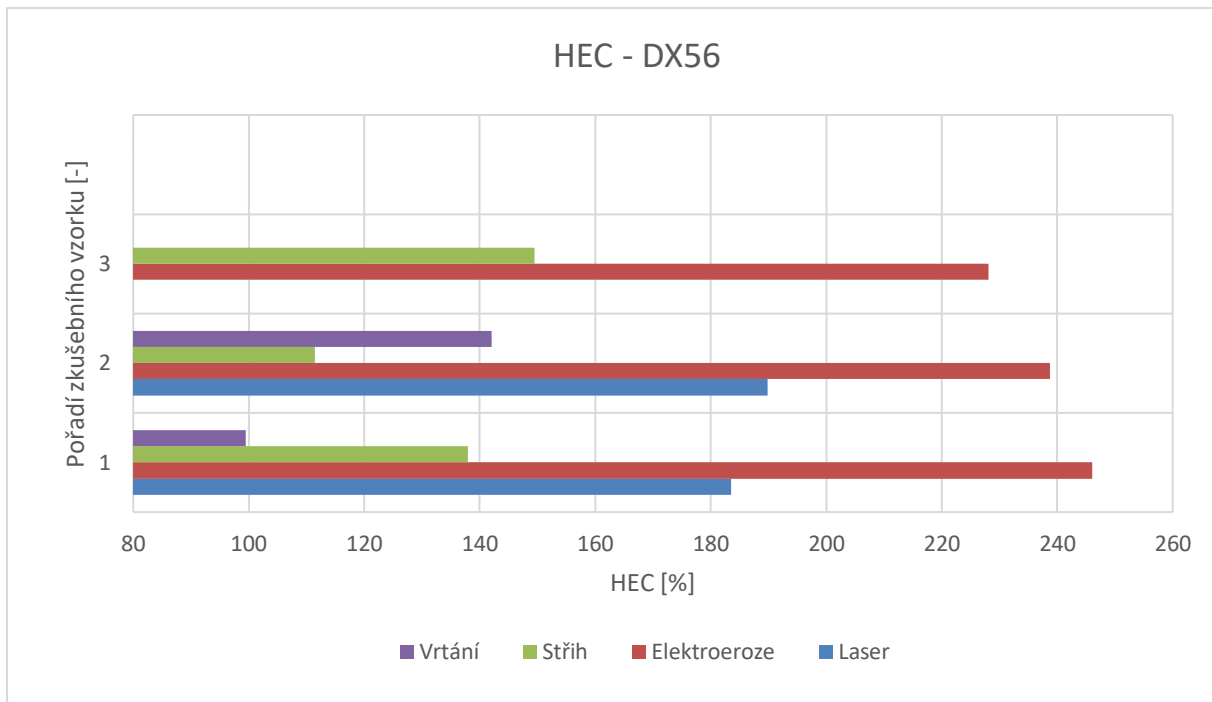
Otvory zhotovené vrtáním u vzorku 1 a 3 mají spíše trojúhelníkový charakter – ostré rohy jsou iniciátory trhlin, proto špatný koeficient HEC. V případě HEC pro vrtání je DC06 srovnatelná s DX57

Nejlepší pro tento materiál je příprava elektroerozí, stříh a vrtání jsou spolu srovnatelné. U tohoto materiálu je zajímavý HEC pro stříh, jelikož rozptyl hodnot je v rámci desítek %.

## 5.4. HET pro materiál DX56

Tabulka 9 Výsledky experimentu pro materiál DX56, tl. 0,7 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1		Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	10,20		9,98		10,00		10,07	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	28,92	28,92	34,54	34,54	23,80	23,80	20,09	20,09
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	28,26		33,50		22,94		19,93	
	HEC [%]	<b>183,5</b>		<b>246,1</b>		<b>138,0</b>		<b>99,5</b>	
2.	D <sub>o</sub> [mm]	10,20		10,00		9,99		10,03	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	29,56	29,56	33,87	33,87	21,13	21,13	24,28	24,28
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	27,73		32,23		21,03		24,22	
	HEC [%]	<b>189,8</b>		<b>238,7</b>		<b>111,5</b>		<b>142,1</b>	
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/		10,00		10,00		/	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			32,817	32,81	24,95	24,95		
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			30,81		24,20			
	HEC [%]			-		<b>228,1</b>			



*Obrázek 31 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DX56*

### Komentář k výsledkům

Materiál DX56 je porovnatelný s materiálem DX57 – řádově odpovídající koeficienty, navíc u DX56 je k dispozici HEC pro laser. Jediný výraznější rozdíl je pro vrtání, první vzorek, kde se hodnoty liší cca o 20 %. Materiál je vhodný k tváření za studena – např. hlubokému tažení.

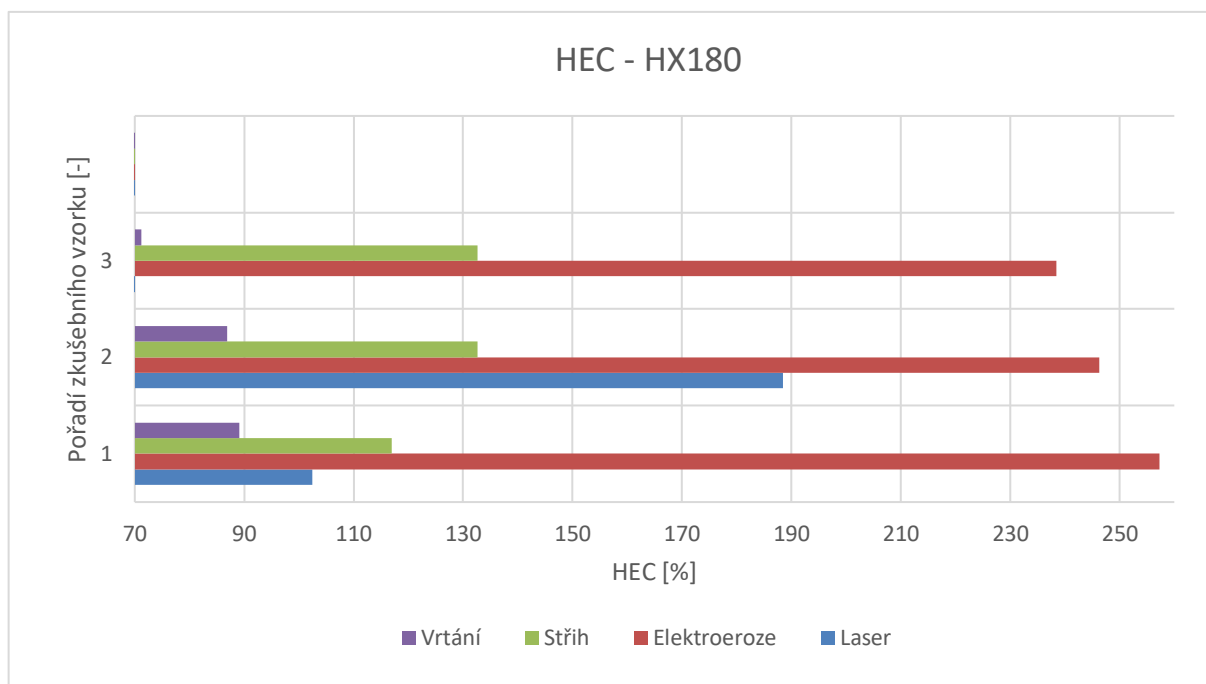
Elektroeroze je opět s nejvyšším koeficientem, za ní laser a nejhorší způsob výroby otvoru pro HET je vrtání a stříhání.



## 5.5. HET pro materiál HX180

Tabulka 10 Výsledky experimentu pro materiál HX180, tl. 0,7 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1		Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	10,20		9,96		9,99		10,00	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	20,65	20,65	35,59	35,59	21,68	21,68	18,91	18,91
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	20,49		32,57		20,46		17,83	
	HEC [%]	<b>102,4</b>		<b>257,3</b>		<b>117,0</b>		<b>89,1</b>	
2.	D <sub>o</sub> [mm]	10,18		9,96		9,99		10,06	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	29,37	29,37	34,49	34,49	23,25	23,25	18,80	18,80
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	22,33		31,60		21,85		18,80	
	HEC [%]	<b>188,5</b>		<b>246,3</b>		<b>132,7</b>		<b>86,9</b>	
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/		9,97		9,95		10,09	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			33,75	33,75	23,15	23,15	17,28	17,28
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			32,65		22,18		17,13	
	HEC [%]			-		<b>238,5</b>		<b>132,6</b>	



*Obrázek 32 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu HX180*

### Komentář k výsledkům

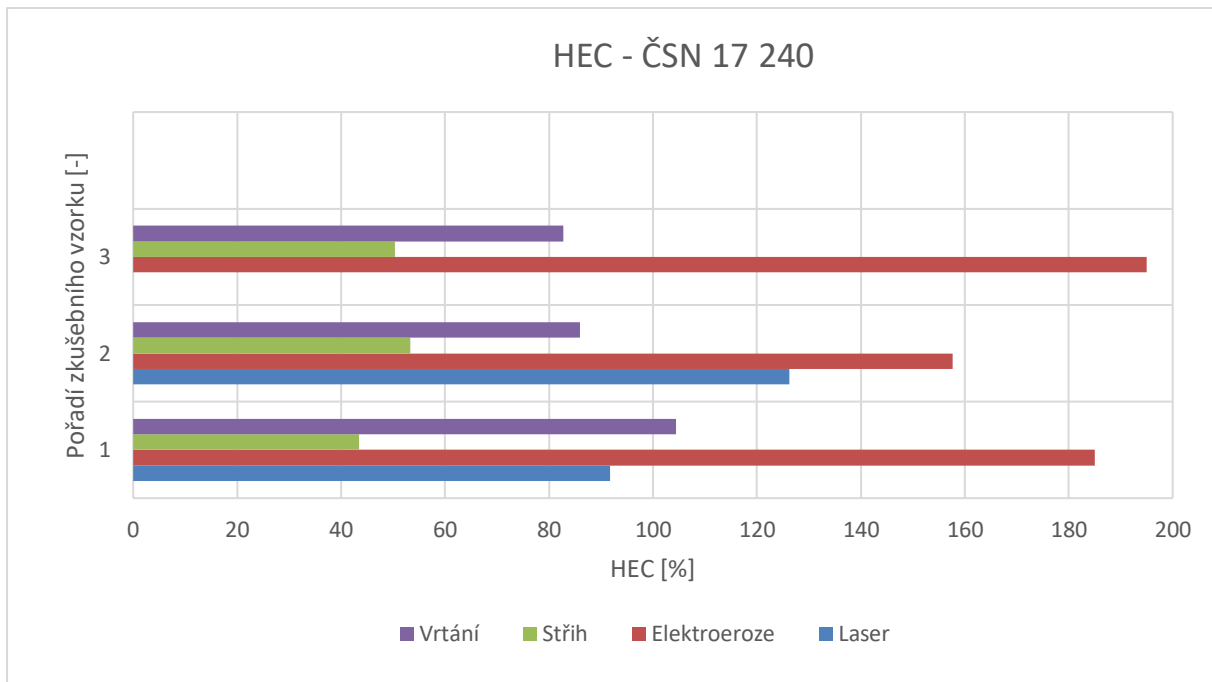
U materiálu HX180 je vidět obrovský rozptyl koeficientu HEC – elektroerozivního obrábění vychází v rozmezí 220-260 %. Ve všech případech je přibližně jednou tak lepší než stříh a vrtání je oproti elektroerozi na třetině s koeficientem HEC.

V tomto případě vyšlo vrtání jako nejhorší možný způsob výroby otvoru pro HET.

## 5.6. HET pro materiál ČSN 14 240

Tabulka 11 Výsledky experimentu pro materiál ČSN 14 240, tl. 0,6 mm

Výroba/ pořadí		Laser – 1		Elektroeroze - 2		Střih - 3		Vrtání – 4	
1.	D <sub>o</sub> [mm]	10,22		10,00		9,96		10,11	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	19,60	19,60	28,5	28,5	14,30	14,30	20,66	20,66
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	18,95		27,19		15,37		20,34	
	HEC [%]	<b>91,8</b>		<b>185,0</b>		<b>43,5</b>		<b>104,4</b>	
2.	D <sub>o</sub> [mm]	10,20		10,00		9,94		10,12	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená	23,08	23,08	25,77	25,77	15,24	15,24	18,81	18,81
	D <sub>n</sub> [mm] změřená	22,30		24,65		15,34		18,24	
	HEC [%]	<b>126,3</b>		<b>157,7</b>		<b>53,3</b>		<b>85,9</b>	
3.	D <sub>o</sub> [mm]	/		10,00		10,03		10,10	
	D <sub>n</sub> [mm] vypočtená			29,50	29,50	15,08	15,08	18,47	18,47
	D <sub>n</sub> [mm] změřená			27,80		15,13		17,59	
	HEC [%]			-		<b>195,0</b>		<b>50,3</b>	



Obrázek 33 Koefficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu ČSN 17 241

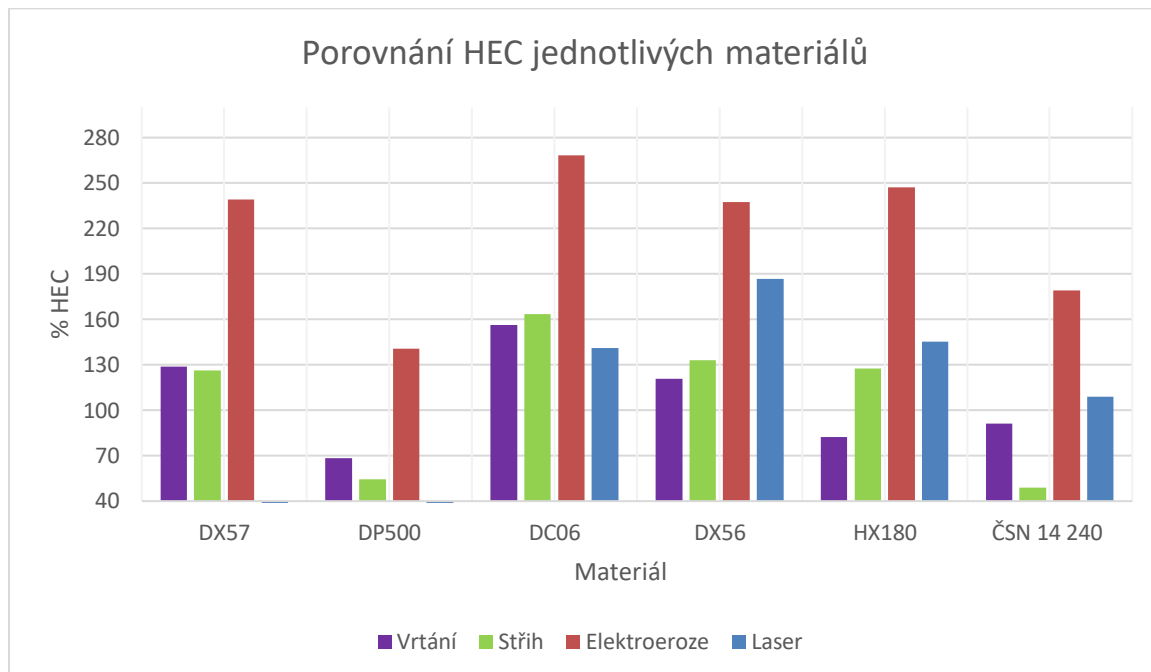
### Komentář k výsledkům

U korozivzdorné oceli vychází opět nejvyšší koeficient HEC pro elektroerozivní obrábění. Překvapivě ale uspěl koeficient u vrtání, který předčil i laser. Tradičně nejhůř vyšlo stříhání, které je oproti elektroerozi přibližně 25 %,

Překvapující ale je, že i tento materiál s vysokou mezí pevnosti má dobré tvářecí schopnosti – viz HEC pro elektroerozi srovnatelný s DX57 – materiál přímo určený k tváření za studena.

## Celkové shrnutí k výsledkům

Ve všech případech u jednotlivých zkušebních vzorků byl koeficient HEC nejvyšší u přípravy otvoru pomocí elektroerozivního obrábění, proto pro zajímavost dávám následující graf. Graf porovnává jednotlivé vzorky a průměrné hodnoty koeficientu HEC pro jednotlivé technologie výroby.



Obrázek 34 Shrnutí koeficientů HEC pro jednotlivé materiály [-]

## 6. Závěr

Pro určení zásoby plasticity materiálu jsou realizovány různé druhy zkoušek. Jedná se například o zkoušky, kdy jsou zjišťovány křivky mezního přetvoření. Tato data jsou pak součástí materiálové karty pro numerickou simulaci, kdy bez těchto dat není možné definovat okamžik porušení materiálu. Metody pro zjišťování křivek mezních přetvoření nám však neříkají žádné informace, jakým způsobem a při jak velkých deformacích dochází ke vzniku trhliny od hrany materiálu.

V rámci diplomové práce se zabývám problematikou vzniku trhliny od hrany materiálu pomocí zkoušky HET (Hole Expansion Test), kdy se zkoumá velikost deformace a s ní spojený vznik trhliny na hraně materiálu.

V úvodní části práce se zabývám problematikou tvářitelnosti, popisuji zkoušky pro ověřování tvářitelnosti. Dále se věnuji problematice zásoby plasticity, a metodám jejich vyhodnocování.

V další části práce se zabývám návrhem experimentu, popisuji materiálové jakosti, na kterých byla experimentální část práce realizována. Dále provádím popis způsobu přípravy zkušebních těles včetně způsobu jejich značení.

Vyhodnocení vytvořených deformací bylo provedeno pomocí posuvného měřítka. Další použitou metodou pro vyhodnocení realizované deformace byl CAD systémem, kdy se vyhodnocovaly fotografie jednotlivých vzorků po provedené zkoušce, ze kterých se určil konečný rozměr dosaženého otvoru. Použití CAD systému umožní určit i míru rozšíření trhliny, která již na provedenou deformaci nemá vliv, a proto její velikost je od výsledné deformace odečtena. Následně se znalosti výchozího a konečného rozměru je možné určit koeficient HEC – informace o plasticitě materiálu.

Předpokládalo se, že nejmenší zásobu plasticity budou mít vzorky zhotovené pomocí stříhu, jelikož na hraně dochází ke zpevnění. Tento předpoklad se potvrdil. Vrtání se považovalo za neutrální metodu přípravy polotovarů, ale jak se ukázalo, je nepatrně lepší než stříhání. Zde patrně největší vliv na výsledky může mít opotřebení vrtáku, ale také skutečnost, že otvor byl prováděn do zkušebního tělesa, kterým byl plech s tloušťkou menší než spolu s vrtáním do mm. Pro další testy bych doporučil použití speciálního vrtáku do plechu.

Předpoklad nejlepších výsledků pro elektroerozivní obrábění se rovněž potvrdil, a to i z důvodu, že se jedná o nejpresnější způsob přípravy vzorků, bez ovlivnění hrany vzorku. Vzorky zhotovené pomocí laseru měly koeficient HEC nepatrně horší než vzorky zhotovené elektroerozí. Laser nevnese do materiálu žádné negativní napětí na průběh zkoušky.

Lze předpokládat, že nejčastější příprava polotovarů z plechů je prováděna pomocí stříhání, zvláště v automobilovém průmyslu. Výsledky experimentu budou však záviset na stavu nástroje, dodržení střížné vůle, která bude mít se stavem nástroje zásadní vliv na míru

zpevnění střižné hrany. A v neposlední řadě je možnost testovat širší spektrum požadovaných materiálů od různých výrobců, různé tloušťky, odlišně šarže aj., z důvodu přesnějších výsledků. Získané výsledky by bylo možné doplnit do materiálových karet v simulačním software a provést ověření získaných výsledků pomocí numerických simulací.

## 7. Seznam použitých zdrojů a literatury

- [1] N.N.: International standard ISO 16630, Metallic Materials – Sheet and Strip – Hole Expanding Test, 2009
- [2] Schneider, M.: Bewertungsmöglichkeiten für das Restumformvermögen einer durch Scherschneiden vorgeschädigten Blechkante (Evaluation Options for the Residual Formability of a Sheet Metal Edge Pre-Damaged by Shear Cutting), EFB 2012, Bad Boll, Germany, 2012
- [3] Schneider, M., Eggers, U.: Investigation on Punched Edge Formability, in: International Deep Drawing Research Group 2011, Bilbao, Spain, 2011
- [4] McEwan, C., Underhill, R., Langerak, N., Botman, G., de Bruine, M.: A New Approach to Predicting Edge Splits – The Combined FLC/HEC Diagram. International Deep Drawing Research Group 2009, Golden, USA
- [5] Watanabe, K.; et al.: Simple Prediction Method for the Edge Fracture of Steel Sheet During Vehicle Collision – Evaluation of Fracture Limit from the Edge Using Small-Sized Test Pieces, 5th LS-Dyna user forum, Ulm, Germany, 2006
- [6] Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy). Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6
- [7] PETRUŽELKA, Jiří a Jiří HRUBÝ. *Výpočetní metody ve tváření*. 1. vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava, 2000. [171] s. ISBN 80-7078-728-7.
- [8] *Nauka o materiálu: Pevnost krystalických materiálů* [online]. VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA, , 31 [cit. 2022-04-01]. Dostupné z: [https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Slide3\\_Pevnost\\_Krystalickych\\_Materialu.pdf](https://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/330/.content/files/Slide3_Pevnost_Krystalickych_Materialu.pdf)
- [9] KOTOUČ, Jiří. *Teorie a metodika tváření: návody ke cvičení*. 1. vyd. Praha: ČVUT, 1992. 84 s. ISBN 80-01-00842-8
- [10] VEGTER, Henk, Carel TEN HORN a Michael ABSPOEL. *The Vegter Lite material model: simplifying advanced material modelling*. *International Journal of Material Forming* [online]. 2011, 4(2), 85-92 [cit. 2022-04-02]. DOI: 10.1007/s12289-010-1006-7. ISSN 1960-6206. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s12289-010-1006-7>
- [11] William Hosford, Robert Caddell. *Metal Forming: mechanics and metallurgy*. Cambridge : Cambridge University Press, 2008. ISBN 978-0-511-35453-3
- [12] *Možnosti použití vysokopevnostních ocelí při výrobě karosářských výlisků*. ČVUT fakulta strojní, 2018. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [13] PETRUŽELKA, Jiří a Pavel SONNEK. *Tvářitelnost kovových materiálů* [online]. 3 Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2006, poslední aktualizace 9.1.2007
- [14] Antony, J.: Design of experiments for engi-neers and scientists, Butterworth-Heinemann, Oxford, 2003.
- [15] ThyssenKrupp Steel, Datasheet DP-W and DP-K dual-phase steels. <http://www.thyssenkrupp-steel-europe.com/tiny/roj/download.pdf>.



- [16] *Metrology systems: ARAMIS for Education [online]*. GOM [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/education/aramis-for-education.html>
- [17] *Metrology systems: ARGUS [online]*. GOM [cit. 2022-07-05]. Dostupné z: <https://www.gom.com/metrology-systems/argus.html>
- [18] Technologie I: (slévání, tváření, svařování a povrchové úpravy). Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02351-6
- [19] *Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software. In: Correlated Solutions [online]*. s. 56 [cit. 2019-01-20]. Dostupné z: <http://www.correlatedsolutions.com/supportcontent/condensed-shortcourse.pdf>
- [20] HLUCHÝ, Miroslav a Jan KOLOUCH. Strojírenská technologie 1. 4., rev. vyd. Praha: Scientia, 2007. ISBN 978-80-86960-26-5.
- [21] ŘASA, Jaroslav, KEREČANINOVÁ, Zuzana: MM Průmyslové spektrum: Nekonenční metody obrábění – 5. díl [online]. [cit. 2022-07-06]. Dostupné z WWW:
- [22] BARCAL, J. Nekonenční metody obrábění. Skriptum FSI ČVUT Vydavatelství ČVUT, Praha 1989. 122s
- [23] *Elektroerozivní obrábění [online]*. Praha, 2021 [cit. 2022-07-06]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/97287/F2-BP-2021-Novotny-Jan-Elektroerozivni%20obrabeni.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Pavel Novák, Ph.D.
- [24] *Plechý válcované za studena [online]*. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.itbohemia.cz/hutni-material/plechy-valcovane-za-studena/>
- [25] *DC05 [online]*. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://teskosteel.com.pl/cz/valcovane-za-studena>
- [26] *Material DX56 [online]*. [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://www.steel-grades.com/index.php?m=pdfmetal&c=index&a=pdf&catid=85&id=216647?EN-10327-DX56D+AS-Datasheet-Down.pdf>
- [27] *Možnost použití vysokopevnostních ocelí při výrobě karosářských výlisků [online]*. Praha, 2018 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/80272/F2-DP-2018-Novak-Vit-Moznost%20pouziti%20vysokopevnostnich%20oceli%20pri%20vyrobe%20karosarskych%20vylisku.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>. Diplomová práce. ČVUT. Vedoucí práce Ing. František Tatíček, Ph.D.
- [28] MACEK, K., Kovové materiály. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-010-3513-1
- [29] BILLUR, Eren a Taylan ALTAN. Three generations of advanced high-strength steels for automotive applications, Part I [online]. 2013, , 2 [cit. 2022-07-08]. Dostupné z: [https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/S\\_FormingAHSS/664-1.pdf](https://ercnsm.osu.edu/sites/ercnsm.osu.edu/files/uploads/S_FormingAHSS/664-1.pdf)
- [30] *Nerezová ocel 17 240 [online]*. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: <https://nerezinox.cz/jakosti-materialu/>
- [31] *Nerezová ocel 17 240 složení [online]*. [cit. 2022-07-10]. Dostupné z: [https://www.daltek.cz/nerez/technicka\\_podpora\\_normy/20\\_prehled\\_jakosti.html](https://www.daltek.cz/nerez/technicka_podpora_normy/20_prehled_jakosti.html)
- [32] ČSN ISO 16630: Zkouška rozšiřováním otvoru. 1. Geneva, Switzerland, 2018.

[33] EVIN, E. The Deformation Properties of High Strength Steel Sheets for Auto-body Components. *Procedia Engineering* [online]. 2022. vol. 69, pp.758-767 [viewed 2022-08- 14]. Available from: DOI 10.1016/j.proeng.2014.03.052

[34] YAN, B., LAURIN, K., XU, K., SRIRAM, S., HUANG, M., CHINTAMANI, J., and LALAM, SH. A New Dual Phase Steel for Automotive Body Panels [online]. 2022. vol. 3, iss. 3 [viewed 202-14-08]. Available from: DOI: 10.4271/2003-01-0518

[-] – vlastní zdroj

## 8. Seznam obrázků

Obrázek 1 Tahový diagram s výraznou mezí kluzu [6] .....	12
Obrázek 2 Rozdíl mezi výraznou a nevýraznou mezí kluzu [6] .....	12
Obrázek 3 Zkouška hlubokotažnosti plechů a pásů dle Erichsena [8] .....	14
Obrázek 4 Keeler-Goodvinův limitvní diagram [13].....	16
Obrázek 5 Závislost polohy FLC na tloušťce materiálu [13] .....	16
Obrázek 6 Závislost polohy FLC na mezí kluzu [13] .....	17
Obrázek 7 Závislost polohy FLC na $r$ a $n$ [13] .....	17
Obrázek 8 Princip a vyhodnocení zkoušky rozšiřováním otvoru [12] .....	19
Obrázek 9 Základní nastavení pro Diablo test, geometrie razníku [14,15] .....	20
Obrázek 10 Paretův diagram pro Diablo test [14] .....	21
Obrázek 11 Porovnání materiálů tvářených za tepla a za studena při Diablo testu [15].....	21
Obrázek 12 Rozdíl jednotlivých zkoušek lámavosti hran při rozšiřování otvoru [1] .....	23
Obrázek 13 FLD s tvářecími operacemi, doplněný o limitní hodnotu praskání na hraně [4] .....	23
Obrázek 14 Charakteristický povrch součásti pro snímání systémem ARAMIS [16].....	25
Obrázek 15 Schéma měřicího systému ARAMIS [16].....	25
Obrázek 16 Kružnicový rastr pro vyhodnocení tvářených systémem ARGUS [17] .....	26
Obrázek 17 Síť pro systém ARGUS před a po tvářecí operaci [19] .....	27
Obrázek 18 Jednoduchý střížný nástroj [18] .....	28
Obrázek 19 Postupový střížný nástroj [18] .....	28
Obrázek 20 Schéma vrtání [20] .....	29
Obrázek 21 Schéma laseru [21] .....	30
Obrázek 22 Schéma elektroerozivního obrábění [23] .....	31
Obrázek 23 Příprava zkušebních vzorků [-] .....	33
Obrázek 24 Porovnání mezí kluzu pro ocel zpevněnou vypalováním povrchu při lisování [27] .....	35
Obrázek 25 Rozměry zkušebních vzorků.....	37
Obrázek 26 Rozměrové vyhodnocení a stanovení HEC [-] .....	39
Obrázek 27 Zkušební vzorek a uprostřed plech deformující tažník [-] .....	39
Obrázek 28 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DX57 .....	42
Obrázek 29 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DP500 .....	44
Obrázek 30 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DC06 .....	46
Obrázek 31 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu DX56 .....	48
Obrázek 32 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu HX180 .....	50
Obrázek 33 Koeficient HEC v kontextu se způsobem výroby u materiálu ČSN 17 241.....	52
Obrázek 34 Shrnutí koeficientů HEC pro jednotlivé materiály [-] .....	53

## 9. Seznam tabulek

Tabulka 1 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DC05 [24,25].....	34
Tabulka 2 Chemické složení a mechanické vlastnosti oceli DX56 [26] .....	34
Tabulka 3 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli DP 500 [27] .....	34
Tabulka 4 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli HX180 [28] .....	35
Tabulka 5 Chemické složení a základní mechanické vlastnosti oceli ČSN 17 240 [31] .....	36
Tabulka 6 Výsledky experimentu pro materiál DX 57, tl. 0,7 mm .....	41
Tabulka 7 Výsledky experimentu pro materiál DP500, tl. 0,60 mm .....	43
Tabulka 8 Výsledky experimentu pro materiál DC06, tl. 0,7 mm .....	45
Tabulka 9 Výsledky experimentu pro materiál DX56, tl. 0,7 mm .....	47
Tabulka 10 Výsledky experimentu pro materiál HX180, tl. 0,7 mm .....	49
Tabulka 11 Výsledky experimentu pro materiál ČSN 14 240, tl. 0,6 mm.....	51