

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

Zjišťování a ověřování deformačních procesů u tvářených ocelí  
vybranými NDT metodami

Autor: **Matěj KOTRBA**

Vedoucí práce: **Ing. Petr BENEŠ, Ph.D.**

Akademický rok 2014/2015



## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne: .....

.....  
podpis autora

# ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

<b>AUTOR</b>	Příjmení <b>KOTRBA</b>	Jméno <b>Matěj</b>	
<b>STUDIJNÍ OBOR</b>	2301R016 „Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie“		
<b>VEDOUcí PRÁCE</b>	Příjmení (včetně titulů) <b>Ing. Beneš, Ph.D.</b>	Jméno <b>Petr</b>	
<b>PRACOVIŠTĚ</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>DRUH PRÁCE</b>	<b>DIPLOMOVÁ</b>	<b>BAKALÁŘSKÁ</b>	Nehodící se <b>škrtněte</b>
<b>NÁZEV PRÁCE</b>	Zjišťování a ověřování deformačních procesů u tvářených ocelí vybranými NDT metodami		

<b>FAKULTA</b>	strojní	<b>KATEDRA</b>	KMM	<b>ROK ODEVZD.</b>	2015
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

## POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

<b>CELKEM</b>	81	<b>TEXTOVÁ ČÁST</b>	60	<b>GRAFICKÁ ČÁST</b>	21
<b>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)  ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</b>	<p>Tato práce se zabývá zkoušením tvářené oceli S235JR-C a hliníkové slitiny EN AW-1090 metodou vířivých proudů, kterou je možné ověřit stupeň deformace materiálu. V rešeršní části je pojednáno o teorii tváření, základních NDT metodách, o teorii vířivých proudů a jejich využití v praxi. V experimentální části jsou zpracovány výsledky měření. Měření tvrdosti dle Vickerse, výsledky vnitřní deformace pomocí simulace deformace, velikost zrna pomocí metalografického vyhodnocení a vířivými proudy určená elektrická vodivost a pohyb pracovního bodu v impedanční rovině.</p>				
<b>KLÍČOVÁ SLOVA</b>	Vířivé proudy, stupeň deformace, tvrdost, velikost zrna, vnitřní deformace, elektrická vodivost				

## SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

<b>AUTHOR</b>	Surname <b>KOTRBA</b>	Name <b>Matěj</b>	
<b>FIELD OF STUDY</b>	2301R016 “Materials Engineering and Engineering Metallurgy“		
<b>SUPERVISOR</b>	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
<b>INSTITUTION</b>	ZČU - FST - KMM		
<b>TYPE OF WORK</b>	<b>DIPLOMA</b>	<b>BACHELOR</b>	<b>Delete when not applicable</b>
<b>TITLE OF THE WORK</b>	Identification and validation of deformation processes in wrought steels by selected NDT methods		

<b>FACULTY</b>	Mechanical Engineering	<b>DEPARTMENT</b>	Department of Material Science and Technology	<b>SUBMITTED IN</b>	2015
----------------	------------------------	-------------------	---	---------------------	------

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

<b>TOTALLY</b>	81	<b>TEXT PART</b>	60	<b>GRAPHICAL PART</b>	21
<b>BRIEF DESCRIPTION</b> <b>TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS</b>	<p>This thesis deals with the testing of molded steel S235JR-C and aluminum alloy EN AW-1090 by eddy currents, which can verify the degree of the deformation of the material. The research part deals with the theory of forming, basic NDT methods, the theory of eddy currents and their use in practice. The experimental part presents the results of the measurement. Measurement of hardness according to Vickers, the results of the internal deformation by the simulation of deformation, grain size by metallographic evaluation and eddy currents determined electrical conductivity and the movement of the working point in the impedance plane.</p>				
<b>KEY WORDS</b>	<p>Eddy currents, degree of deformation, hardness, grain size, internal deformation, electrical conductivity</p>				

## **Poděkování**

Na tomto místě bych velmi rád poděkoval všem, kteří mi pomáhali při psaní této bakalářské práce. Upřímné poděkování patří předně vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné vedení, cenné rady a důležité připomínky. Dále děkuji své konzultantce paní Ing. Soně Benešové, Ph.D. za poskytnuté konzultace a rady, panu Ing. Milanu Vnoučkovi, Ph.D., panu Ing. Davidu Bricínovi a panu Ing. Ivanu Vorlovi.

## Obsah

Prohlášení o autorství .....	3
Obsah .....	7
Seznam zkratk a symbolů .....	10
1 Úvod .....	11
2 Teoretické základy procesů deformačního zpevnění kovových materiálů .....	11
2.1 Poruchy krystalové struktury .....	11
2.1.1 Dislokace .....	12
2.2 Pohyb dislokací .....	15
2.2.1 Skluzový pohyb .....	15
2.2.2 Difuzní pohyb .....	16
2.3 Procesy odpevňování .....	16
2.3.1 Zpevnění a odpevňování .....	16
2.3.2 Zotavení a rekystalizace .....	17
2.4 Mechanismy zpevnění .....	18
2.4.1 Deformační zpevnění .....	18
2.4.2 Zpevnění fázovými přeměnami (bainitickou a martenzitickou) .....	18
2.4.3 Příměsové zpevnění .....	19
2.4.4 Precipitační zpevnění .....	20
2.5 Klasifikace tváření kovů .....	21
2.6 Druhy tvářecích procesů .....	22
2.6.1 Kování .....	22
2.6.2 Válcování .....	23
2.6.3 Protlačování .....	24
2.7 Tvařitelnost .....	25
2.8 Metody zjišťování deformace .....	25
2.8.1 Zkoušky destruktivní .....	26
2.8.2 Metalografické vyhodnocování .....	26
3 Úvod do metod NDT .....	27
3.1 Vizuální zkoušky .....	27
3.2 Kapilární zkoušky .....	28
3.3 Zkoušky magnetické a elektrické .....	29
3.3.1 Zkoušky magnetické .....	29

3.3.2	Zkoušky indukční .....	30
3.4	Zkoušení vířivými proudy .....	30
3.5	Zkoušky ultrazvukem .....	30
3.6	Zkoušky akustické .....	31
3.7	Zkoušky prozařovací .....	31
3.7.1	Rentgenové záření .....	32
3.7.2	Gama záření.....	32
3.7.3	Betatronové záření.....	32
3.7.4	Neutronové záření .....	32
4	Vířivé proudy .....	33
4.1	Základní fyzikální princip .....	33
4.2	Zkoušení materiálu pomocí vířivých proudů.....	33
4.3	Výhody a omezení zkoušky vířivými proudy.....	34
4.4	Měřicí sondy a jejich typy .....	35
4.4.1	Absolutní sondy.....	35
4.4.2	Diferenční sondy .....	36
4.4.3	Reflexní sondy.....	37
4.4.4	Hybridní sondy .....	38
4.4.5	Nejčastěji používané sondy .....	38
4.5	Nové trendy ve zkoušení materiálu vířivými proudy .....	38
4.5.1	Eddy Current Array .....	38
4.5.2	Metoda INCOTEST .....	39
5	Změna vlastností materiálů v důsledku deformačních procesů .....	39
6	Praktické využití metody vířivých proudů.....	41
7.1	Hliníková slitina EN AW-1090 .....	45
7.1.1	Příprava vzorků .....	45
7.1.2	Měření tvrdosti dle Vickerse .....	47
7.1.3	Simulace deformace .....	48
7.1.4	Zjišťování deformace vířivými proudy .....	50
7.1.5	Metalografické vyhodnocení.....	53
7.1.6	Porovnání naměřených výsledků .....	54
7.2	Konstrukční ocel S235JR-C .....	54
7.2.1	Příprava vzorků .....	54



7.2.2	Metalografické vyhodnocení .....	55
7.2.3	Měření tvrdosti dle Vickerse .....	57
7.2.4	Zjišťování deformace vířivými proudy .....	57
7.2.5	Porovnání naměřených výsledků .....	59
8	Diskuze výsledků .....	60
9	Závěr .....	61
10	Použitá literatura .....	62
11	Seznam příloh.....	66

## Seznam zkratk a symbolů

HB	- tvrdost podle Brinella
HV	- tvrdost podle Vickerse
R <sub>m</sub>	- mez pevnosti v tahu [MPa]
Re	- mez kluzu v tahu [MPa]
A	- tažnost [%]
Z	- kontrakce [%]
$\sigma_{ef}$	- efektivní napětí [MPa]
M <sub>s</sub>	- martenzit start [°C]
M <sub>f</sub>	- martenzit finiš [°C]
$\alpha$	- fáze železa
IRA	- izotermický rozpad austenitu
ARA	- anizotermický rozpad austenitu
NDT	- non destructive testing - nedestruktivní zkoušení
dB	- decibel - logaritmická jednotka intenzity zvuku
K	- kelvin - jednotka termodynamické teploty
Hz	- hertz - jednotka frekvence

## 1 Úvod

Cílem této práce je ověřit možnost zjišťování velikosti deformace, deformačního zpevnění, pomocí jedné z NDT technik a to pomocí metody vířivých proudů. Velikost deformačního zpevnění je v současnosti určována pomocí převážně destruktivních metod, jako je měření tvrdosti, metalografické hodnocení apod. Cílem této práce je tedy ověřit, zda lze metodou vířivých proudů ověřit stupeň deformace materiálu. Z důvodu ověření použitelnosti metody vířivých proudů bude v této práci použito i jiných metod. Měření tvrdosti materiálu dle Vickerse, simulace deformace a metalografické vyhodnocení.

Experimentální program je proveden na dvou odlišných, v praxi běžně používaných materiálech: hliníkové slitině EN AW-1090 a konstrukční oceli S235JR-C. Výběr hliníkové slitiny EN AW-1090 byl proveden s ohledem na její výborné tvárné schopnosti. Konstrukční ocel S235JR-C byla vybrána s ohledem na její značně široké rozšíření ve strojírenství jako běžně používaný konstrukční materiál.

Deformační zpevnění může mít jak pozitivní, tak negativní aspekt. Některé operace jsou záměrně konány právě proto, aby bylo dosaženo vyšší tvrdosti a pevnosti materiálu. U některých operací je ale deformační zpevnění přidruženým negativním jevem, neboť se materiál stává méně houževnatý a může tak dojít k tvorbě lokálních defektů (trhlin). Materiál je plasticky vyčerpán a hrubne také zrno. Z toho důvodu je u materiálu nutné vyšetřit velikost deformačního zpevnění.

## 2 Teoretické základy procesů deformačního zpevnění kovových materiálů

Procesy deformačního zpevnění souvisí s plastickou deformací. Mechanické vlastnosti látek jsou nejvíce ovlivňovány dislokacemi. Zjednodušeně lze říci, že v pružné oblasti se dislokace nepohybují a teprve v okamžiku, kdy napětí působící na dislokaci překročí kritickou mez a dislokace se dají do pohybu, lze hovořit o plastické deformaci. Protože pohyb dislokací je tak důležitý zejména pro charakterizování plastických vlastností látek (a zejména kovů), je potřeba dislokace podrobněji popsat. [1]

### 2.1 Poruchy krystalové struktury<sup>1</sup>

Existují čtyři druhy poruch krystalové struktury materiálu. Jejich rozdělení podle dimenze je následující:

---

<sup>1</sup> Tato kapitola se zabývá dislokacemi, jejichž vliv na deformační zpevnění je prioritní. Bodové, plošné a objemové poruchy nejsou blíže popsány.

- Bodové (bezrozměrné)
  - Vakance
  - Substituční atom
  - Intersticiální částice
- Čárové (jednorozměrné)
  - Dislokace
- Plošné (dvojrozměrné)
  - Hranice podzrn
  - Hranice zrn
  - Vrstevné chyby
- Objemové (trojrozměrné)

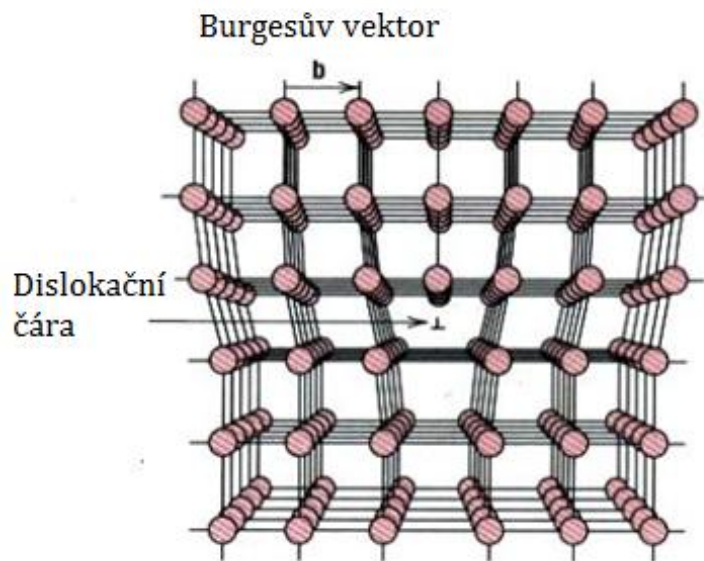
### 2.1.1 Dislokace

Dislokace patří mezi čárové poruchy. Existují dva základní druhy dislokací. Dislokace hranová a dislokace šroubová. Dislokace, která má vlastnosti obou se nazývá dislokace smíšená.

Na rozdíl od vakancí, kdy při vzestupu teploty jejich počet exponenciálně stoupá, lze i při teplotách vyšších než 0 K vyrobit krystal bez dislokací.

#### Dislokace hranová

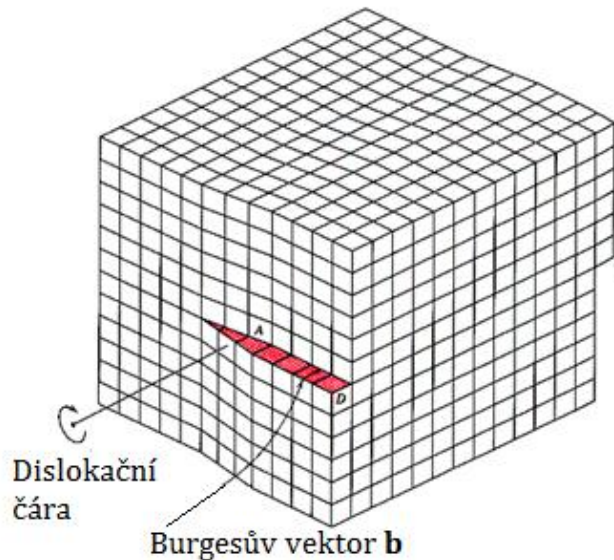
Na obr. 1 je znázorněna hranová dislokace. V obr. 1 je zakreslen tzv. Burgesův vektor, který vznikne tak, že se kolem dislokace vytvoří Burgesova smyčka, skládající se ze stejného počtu kroků doprava jako doleva a nahoru jako dolů. Burgesova smyčka kolem dislokace není uzavřená.



Obr. 1 - Hranová dislokace. [1]

## Dislokace šroubová

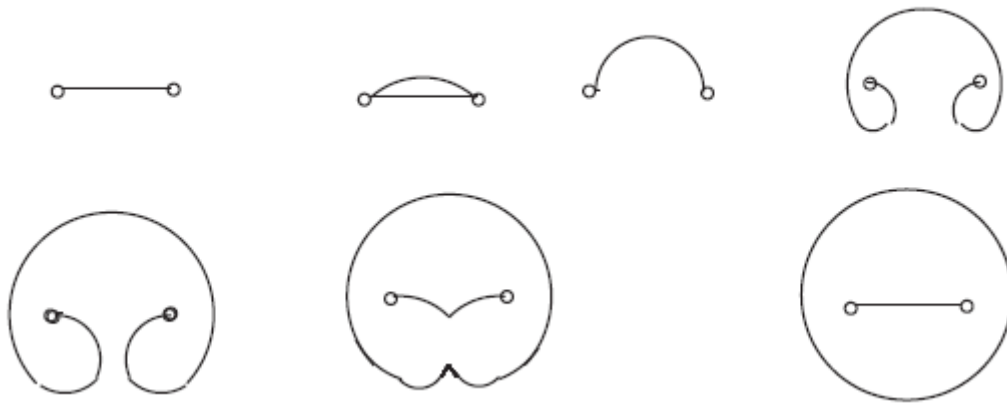
Šroubová dislokace vznikne tak, že je krystal namáhán stříhem. Burgesův vektor této dislokace je rovnoběžný s dislokační čarou a existuje tedy velký počet skluzových rovin, v nichž se dislokace může pohybovat (dislokační čára je osou svazku všech těchto skluzových rovin). [1]



Obr. 2 - Šroubová dislokace. [1]

Ke zvyšování hustoty dislokací dochází vlivem smykového napětí, které na ně působí a které aktivuje dislokační zdroje (hustota dislokací se zvětšuje o 4 až 5 řádů a může dosáhnout až hodnoty  $\rho=10^{12} \text{ cm}^{-2}$ ).

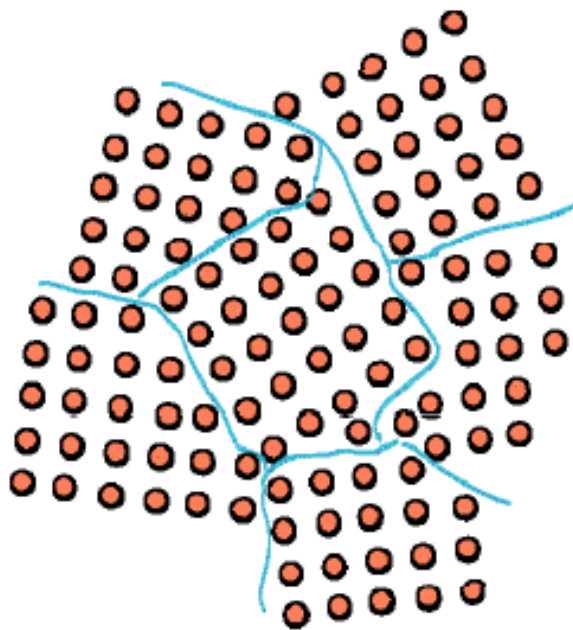
Při plastické deformaci hustota dislokací neklesá, ale naopak ještě více roste. Frank a Reed vysvětlili proč tomu tak je. Frankův-Reedův zdroj "emituje" velké množství dislokací odpovídající makroskopické deformaci. Mechanismus Frank-Reedova zdroje neposkytuje dislokace neomezeně dlouho, neboť vzniklé dislokační smyčky jsou téhož znaménka, a proto se vzájemně odpuzují, takže působí proti činnosti zdroje. [19], [16], [25]



Obr. 3 - Frank-Reedův zdroj dislokací. [31]

### Hranice zrn

Jednotlivá krystalická zrna vytvářejí mezi sebou hranice. Ty dosahující tloušťky v desítkách mřížkových parametrů. Krystalické mřížky zrn jsou pootočený o úhel větší než  $10$  až  $15^\circ$ . Poloha sousedních zrn může být i taková, že některé krystalografické směry v obou zrnech jsou koincidentní. Pak mluvíme o koincidentní hranici. Jiné typy vnitřních rozhraní mohou být charakterizovány návazností krystalografických rovin obou fází, pak se jedná o koherentní, případně při částečné návaznosti, semikoherentní rozhraní. [26]



Obr. 4 - Hranice zrn. [27]

## 2.2 Pohyb dislokací

Schopnost pohybuje jedna z nejdůležitějších vlastností dislokací. Dislokace se může pohybovat jako celek, nebo se pohybují různou rychlostí její části, takže se mění tvar dislokační čáry.

V důsledku smykového napětí se naruší vazby v okolí dislokace a vzniká napěťové pole, nerovnovážený stav. Dislokace se proto dává do pohybu a při dalším zvýšení smykového napětí se posune o jednu meziatomovou vzdálenost ve směru působení napětí. Dislokace se pak posouvá vlivem působení smykového napětí do té doby, než se dostane z krystalu ven.

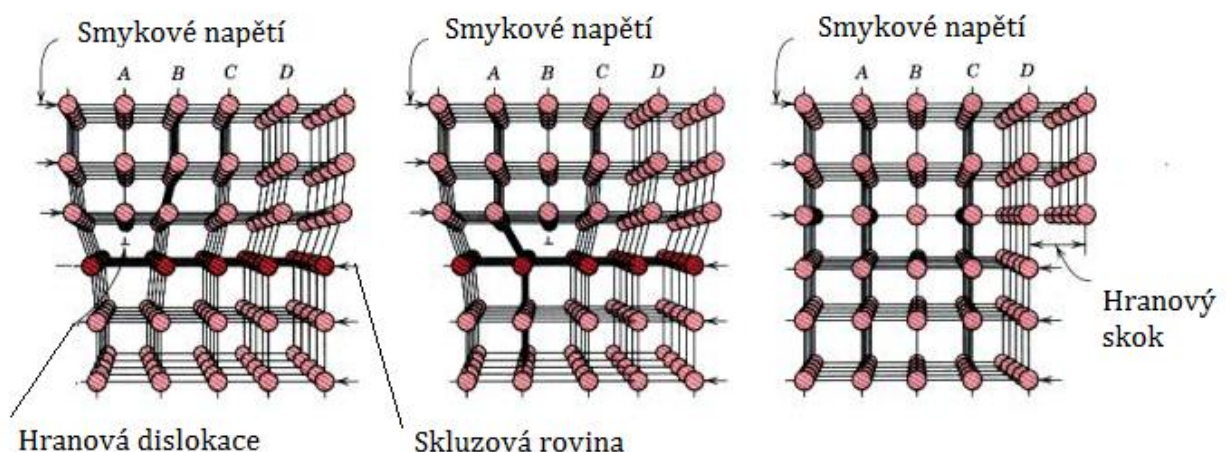
Rozlišujeme dva pohyby dislokací:

- Pohyb skluzový
- Pohyb difúzní

### 2.2.1 Skluzový pohyb

Skluzový pohyb probíhá v rovině skluzu dané směrem Burgeseva vektoru a dislokační čáry, popřípadě tečny k této čáře u křivočaré dislokace. Skluzová rovina je rovina nejhustěji obsazena atomy. Pohyb probíhá v krystalové mřížce bez jiných poruch účinkem velmi malého napětí, tzv. napětí Peierlsova-Nabarrova. Rychlost pohybu dislokace závisí na působící síle, na typu krystalové mřížky, na vazbě mezi atomy a především na množství poruch v mřížce.

Bude-li například skluzové napětí působit zprava doleva jako je znázorněno na obr. 5, bude se tímto směrem pohybovat i dislokace a výsledkem bude skok o velikosti Burgeseva vektoru na povrchu krystalu. [1], [16]



Obr. 5 - Skluzový pohyb hranové dislokace. [1]

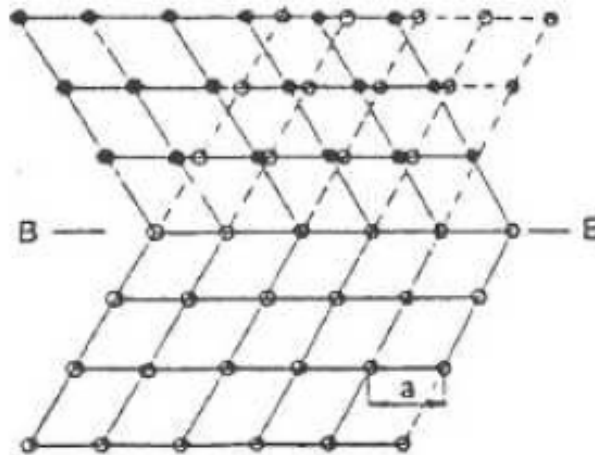


## 2.2.2 Difúzní pohyb

Difúzní pohyb (také lezení nebo šplh) je spojen s difúzí vakancí nebo intersticiálních atomů k dislokaci. Pohyb nastává u hranové dislokace v rovině vložené poloroviny, tedy kolmo k Burgesovu vektoru, tím způsobem, že atomy z hrany vložené poloroviny difundují do intersticiálních poloh nebo na vakantní uzlové body, případně intersticiální atomy přecházejí difúzním pohybem k dislokační polorovině.

## Dvojčatění<sup>2</sup>

Dvojčatění je deformační mechanismus, při němž se část krystalové mřížky posune tak, že vytváří zrcadlový obraz neposunuté části mřížky. Obě části mřížky jsou zrcadlově symetrické k rovině dvojčatění. Dvojčatění probíhá za velmi nízkých teplot a vysokých rychlostí deformace. Dvojčatění se uplatňuje jako doplňující deformační mechanismus tehdy, když "nejsou funkční" skluzové systémy. Tento deformační mechanismus je velmi ojedinělý a netradiční. [26]



Obr. 6 - Dvojčatění. [13]

## 2.3 Procesy odpevnění

### 2.3.1 Zpevnění a odpevnění

Při tváření kovů obecně nastávají dva děje, a to *zpevnění a odpevnění*. Výsledný efekt závisí na vzájemné rychlosti obou dějů. Při tváření za studena odpevnění prakticky neprobíhá (nízká teplota při tváření), proto se materiál zpevňuje, zatímco při tváření za tepla probíhá odpevnění okamžitě a materiál se nezpevňuje (dynamická rekrytalizace). Pokud by mělo dojít

---

<sup>2</sup> Dvojčatění není způsob pohybu dislokace. Dochází však během něj k přesouvání atomů mezi rovinami v krystalu a proto je zmíněna základní teorie.



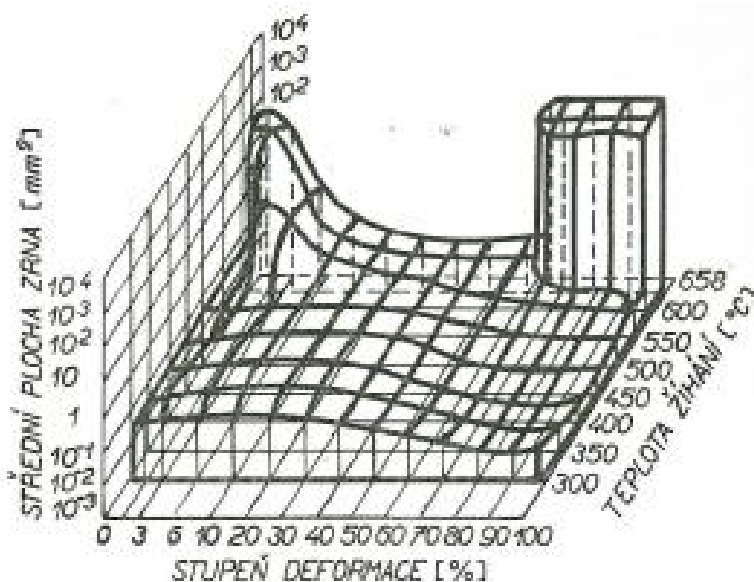
k odpevnění materiálu po tváření za studena, musela by být provedena rekrytalizace podle rekrytalizačního diagramu (viz obr. 7).

### 2.3.2 Zotavení a rekrytalizace

Při působení vyšší teploty bude docházet ke zvyšování pohyblivosti atomů, ke snižování energie deformovaného kovu. Mohou nastat dva děje, *zotavení* (tj. zánik mřížkových deformací a napětí) a *rekrytalizace* (vznik zárodků a růst nových zrn). Zotavení a rekrytalizace jsou závislé na teplotě, čase a na předchozím stupni tváření.

Rekrytalizace může nastat jen při dosažení teploty rekrytalizace, která je empiricky stanovená na 35 až 40 % teploty tání daného kovu.<sup>3</sup> Během rekrytalizace se netvoří struktura nové fáze, nýbrž nová struktura stejné fáze namísto původní deformované struktury tvářením. Zotavením dochází k uspořádání dislokací a ke snižování deformační energie, pevnost a mez kluzu klesá a tažnost stoupá (prakticky klesá vnitřní pnutí). Navíc dochází ke změně velikosti zrna, která závisí na předchozím stupni deformace. Při větším stupni deformace dostáváme jemnější zrno a naopak. Výsledkem rekrytalizace je nová struktura bez znaků deformace. Rychlost zotavení je závislá na teplotě a na čase.

Teplotní oblasti zotavení a rekrytalizace se překrývají, takže oba děje probíhají z části současně. [18], [20]



Obr. 7 -Rekrytalizační diagram. [24]

<sup>3</sup> V současné době při tváření za tepla volíme teplotu tváření až 70 % teploty tání, kdy začíná probíhat rekrytalizace současně se zpevněním.

## 2.4 Mechanismy zpevnění

### 2.4.1 Deformační zpevnění

V polykrystalickém kovu začne skluz v nejpříznivěji orientovaných zrnech. Ke skluzu v jiných zrnech je zapotřebí dalšího zvýšení vnější síly a dojde k němu později. Jednotlivá zrna se nemohou deformovat volně, ale musí se vzájemně přizpůsobovat. To vyžaduje složité přesuny, pro které je třeba dostatek skluzových možností. Kovy s vysokým počtem skluzových rovin a směrů jsou dobře tvárné, naopak kovy s malým počtem skluzových systémů špatně tvárné a křehké.

Při deformaci polykrystalu brzy dochází ke kupení dislokací, jež vznikají činností Frank-Reedových zdrojů na hranicích zrn, které jsou pro pohyb dislokací neprůchodnou překážkou. Dochází-li k dalšímu zvyšování hustoty dislokací, materiál se deformačně zpevňuje.

Plastická deformace nastane v zrně, jehož skluzová rovina je nejbližší úhlu  $45^\circ$ . Při dalším zatěžování dojde k deformaci zrna, které je méně výhodně orientováno. [19], [27]

### 2.4.2 Zpevnění fázovými přeměnami (bainitickou a martenzitickou)<sup>4</sup>

#### Bainitická přeměna

Při středně velkém přechlazení, tj. v teplotním intervalu mezi perlitickou a martenzitickou oblastí, se přechlazený austenit rozpadá v nerovnovážnou heterogenní strukturu - bainit. Bainit má tetragonální prostorově středěnou mřížku. Mechanismus tvorby bainitu i jeho morfologie se výrazně mění s reakční teplotou a proto se rozlišuje horní bainit a dolní bainit. Teplotní hranice mezi horním a dolním bainitem závisí na obsahu uhlíku. Orientačně je tato teplota uváděna jako  $400^\circ\text{C}$ .

S transformační teplotou se mění také vlastnosti bainitu. Jeho tvrdost i pevnostní vlastnosti s klesající teplotou přeměny vzrůstají. Poměrně vysoká pevnost bainitu je způsobena rozdílnými druhy zpevnění. Je to velmi jemné zrna bainitického feritu, jenž má vysokou hustotu dislokací a je dále zpevněn uhlíkem v tuhém roztoku. Významným příspěvkem je také disperzní zpevnění vyprecipitovanými karbidy.

Bainitická přeměna se teplotně může překrývat s přeměnou martenzitickou.

#### Martenzitická přeměna

Je-li austenit přechlazen až do oblasti tak nízkých teplot, že již není možná účinná difúze nejen přísadových prvků, ale také uhlíku, přeměňuje se austenit bezdifúzní přeměnou v martenzit. Martenzit má mřížku tetragonální prostorově středěnou s vysokou hustotou dislokací. Produktem martenzitické přeměny, která probíhá v rozmezí teplot  $M_s$  až  $M_f$ ,

---

<sup>4</sup> Zpevnění fázovými transformacemi není prioritní pro řešení této práce, proto není problematika vysvětlena podrobněji.

je nerovnovážený, silně přesycený tuhý roztok uhlíku v železe  $\alpha$ , zvaný martenzit. Podíl martenzitu závisí na teplotě přeměny. Aby vznikla tato metastabilní fáze, která je hlavní strukturní složkou zakalených ocelí, je nutné ochlazovat austenitizovanou ocel pod teplotu  $M_s$  v čase kratším, než je doba potřebná pro zahájení perlitické nebo bainitické přeměny. Minimální rychlost, při které jsou ještě zcela potlačeny difúzní přeměny austenitu a probíhá jeho bezdifúzní přeměna na martenzit, se označuje jako kritická rychlost kalení. Její hodnota závisí na složení a na struktuře austenitu.

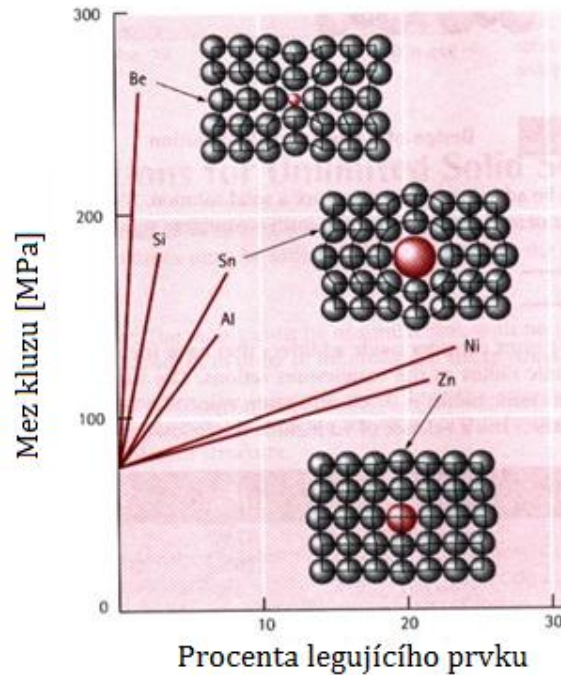
Martenzit kalitelných ocelí se vyznačuje vysokou pevností a tvrdostí, ale mnohdy také značnou křehkostí. Na pevnost martenzitu mají vliv především tyto faktory: velikost zrna, prvky rozpuštěné intersticiálně a substitučně v tuhém roztoku, mikrosegregace a precipitace uhlíku, substruktura martenzitu. Zpevnění je také způsobeno účinkem intersticiálních prvků v tuhém roztoku. Substituční prvky také zpevňují martenzit, ale ve srovnání s uhlíkem je jejich vliv jen malý.

Izotermický a anizotermický rozpad austenitu popisují diagramy IRA a ARA. [22]

### 2.4.3 Příměsové zpevnění

Už v době bronzové člověk objevil, že vzájemným slitím dvou měkkých kovů, tj. mědi (44 HB) a cínu (4 HB) lze získat mnohem tvrdší slitinu, zvanou bronz (360 HB). Dá se předpokládat, že podobný vliv budou mít atomy příměsí i na mechanické vlastnosti vzniklé slitiny.

Z obr. 8 lze odvodit, jaký vliv má rozdíl poloměrů atomů příměsí a základního prvku na velikost meze kluzu slitiny (v okolí větších, nebo menších atomů vzniká velké napětové pole a v oblastech, v nichž jsou taková pole rozmístěna, se dislokace obtížněji šíří). Pokud jsou poloměry obou druhů atomů přibližně stejné, není vliv atomů příměsí příliš velký (daný je zřejmě pouze rozdílem vazeb mezi atomy základního prvku mezi sebou a atomy příměsí a atomy základního prvku navzájem – Zn a Ni v Cu). Je-li rozdíl poloměrů atomů příměsí a atomů základního prvku větší, je vliv atomů příměsí na mez kluzu slitiny mnohem zásadnější (Al, Sn a Si, Be v Cu). [1]



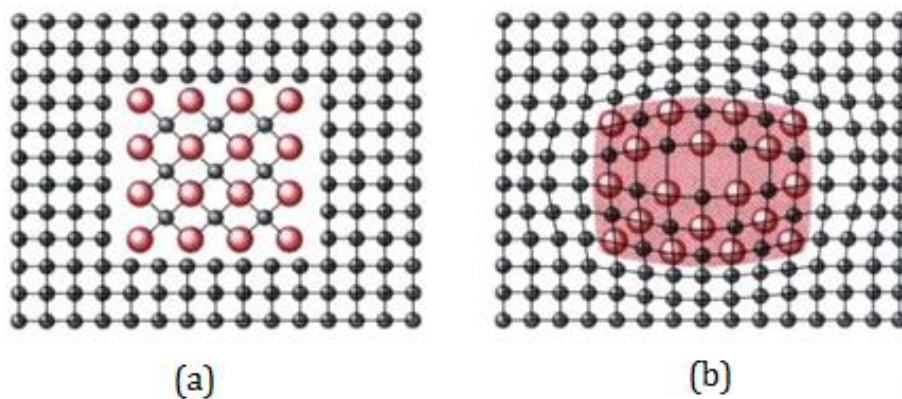
Obr. 8 - Vliv velikosti atomů příměsí na zpevnění mědi. [1]

Vliv atomů příměsí na vlastnosti slitin:

- Mez kluzu, zpevnění a tvrdost slitiny dosahují vyšších hodnot, než pro čistý kov
- Tažnost většiny slitin je menší, než tažnost čistého kovu

#### 2.4.4 Precipitační zpevnění

Má-li materiál rozpustnost prvků omezenou nebo nulovou, vznikají v materiálu matrice tzv. vměstky neboli precipitáty. Jsou to tzv. částice druhé fáze, které mají často zcela odlišné fyzikální a chemické vlastnosti a krystalickou strukturu. Obr. 9 představuje schematické znázornění koherentního a nekoherentního precipitátu.



Obr. 9 - Precipitační zpevnění: a) nekoherentní precipitát, b) koherentní precipitát. [1]

Oba druhy precipitátů jsou značnou a většinou nepřekonatelnou překážkou pro pohyb dislokací. Typickým materiálem, ve kterém se vyskytují precipitáty různého složení i různého tvaru, je ocel, což je slitina železa a uhlíku. Precipitáty v oceli jsou tvořeny většinou karbidem železa (cementitem)  $\text{Fe}_3\text{C}$ , který mívá tvar kuliček, destiček, nebo má tvar nepravidelný. [1]

## 2.5 Klasifikace tváření kovů

Litý (ingot, předlitek z kontinuálního lití), nebo již dříve tvářený polotovár je plasticky deformován mezi nástroji za účelem dosažení požadované konečné konfigurace. Tvářecí procesy jsou rozděleny do dvou základních kategorií:

- Objemové
- Plošné

V obou typech procesu jsou povrchy deformovaného kovu v kontaktu s nástrojem a tření mezi nimi může mít velký vliv na tok materiálu. Při objemovém tváření, kdy vstupní materiál je sochor, tyč nebo deska, se poměr povrchu k objemu výrazně zvyšuje pod působením velkého zatížení (tlakového, resp. kombinace tlakového a tahového). Naproti tomu při tváření plechů se tento kus plechu plasticky deformuje do trojrozměrného tvaru, často bez významných změn v tloušťce nebo povrchové charakteristice.

Procesy, které spadají do kategorie objemového tváření, mají následující charakteristické rysy:

- Deformování materiálu a vznik velké plastické deformace, což má za následek značné změny tvaru nebo průřezu
- Při tváření za studena probíhá snadněji plastická deformace a je nutno počítat s velkým odpružením při pružné deformaci
- Při tváření za tepla snáze probíhá pružná deformace a také snáze odpruží

Z hlediska teploty se pak tvářecí procesy dělí na:

- Tváření za studena
- Tváření za tepla [2]

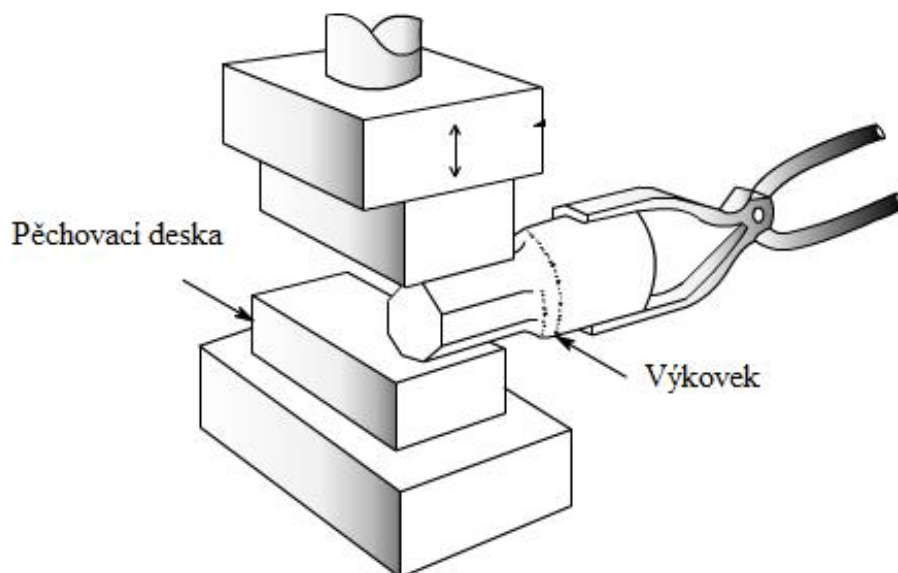
## 2.6 Druhy tvářecích procesů<sup>5</sup>

Základní rozdělení tvářecích procesů:

- Kování
- Válcování
- Protlačování
- Tažení
- Stříhání
- Ohýbání
- Rovnání
- Nekonenční metody

### 2.6.1 Kování

Volné kování lze od většiny jiných typů deformačních procesů odlišit tím, že poskytuje nesouvislý tok materiálu na rozdíl od kontinuálního toku. Kování je objemové tváření za tepla, prováděné úderem nebo působící silou. Výsledným produktem kování je výkovek, který má požadovaný tvar, příznivou makrostrukturu, výhodnou mikrostrukturu a zvýšené mechanické a fyzikální vlastnosti. Kováním lze zpracovat téměř všechny kovy. Hlavní důraz při kování se klade na minimální spotřebu materiálu, optimální přesnost výkovku, vysokou jakost tvářeného kovu, příznivý průběh vláken a na ekonomii provozu.



Obr. 10 - Schéma volného kování. [29]

<sup>5</sup> V práci je z důvodu priority problematiky uvedeno pouze základní rozdělení tvářecích procesů, včetně podrobnějšího popisu některých z nich.



Základní rozdělení kování:

- Volné kování
- Zápustkové kování [25]

Výkovky jsou volným kováním vyráběny, pokud:

- Kování v uzavřených maticích by bylo příliš obtížné
- Požadované mechanické vlastnosti tvářeného kovu, které mohou být dosaženy volným kováním, nelze získat jinými deformačními procesy
- Požadované množství výkovků je příliš malé, tudíž je z ekonomického hlediska nevýhodné použití uzavřených matic
- Konečný termín předání zakázky je příliš blízko na to, aby bylo možné zhotovení zápustek pro zápustkové kování

Jednou ze základních operací technologie volného kování je pěchování. Operace, při které je síla vyvinutá jedním nebo více údery kovačského nástroje. Při pěchování dochází k rozrušení (přemístění) kovu, aby se vytvořil úsek o odlišných tvarech, nebo častěji o větším průřezu než je originál. [2]

Při kování za tepla, které je doprovázeno intenzivní rekrystalizací, nedochází k deformačnímu zpevnění. K deformačnímu zpevnění by mohlo dojít při kování za studena, které se však neprovádí.

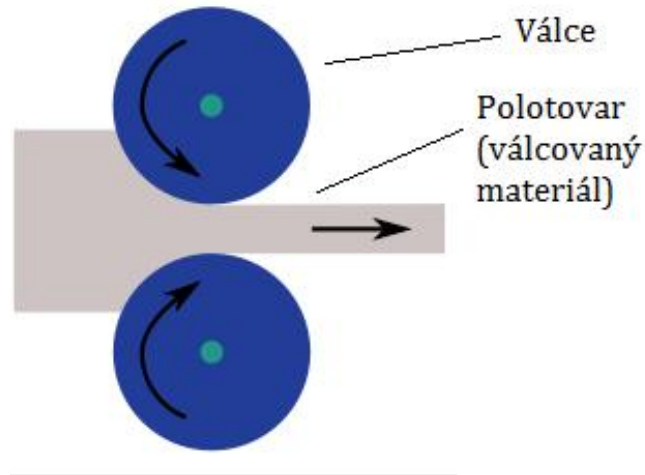
### 2.6.2 Válcování

Válcování je kontinuální proces, při kterém se tvářený materiál deformuje mezi otáčejícími se pracovními válci za podmínek převažujícího tlaku. Válcovaný materiál se mezi válci deformuje, výška se snižuje, materiál se prodlužuje a současně rozšiřuje a mění se i rychlost, kterou válcovaný materiál z válcovací stolice vystupuje. Mezera mezi pracovními válci je menší, než vstupní rozměr materiálu. Válcování se provádí především za tepla, ale i za studena. Výsledkem procesu válcování je vývalek. Podle směru, kterým válcovaný materiál prochází pracovními válci, podle uložení os válců vzhledem k válcovanému materiálu a podle průběhu deformace pak válcování dělíme na:

- Podélné
- Příčné
- Kosé

Mezi základní druhy válcování podle polotovaru patří:

- Válcování drátů
- Válcování plechů
- Válcování profilů
- Válcování trubek
- Válcování kotoučů a kroužků [25]



Obr. 11 - Válcovací stolice. [23]

### 2.6.3 Protlačování

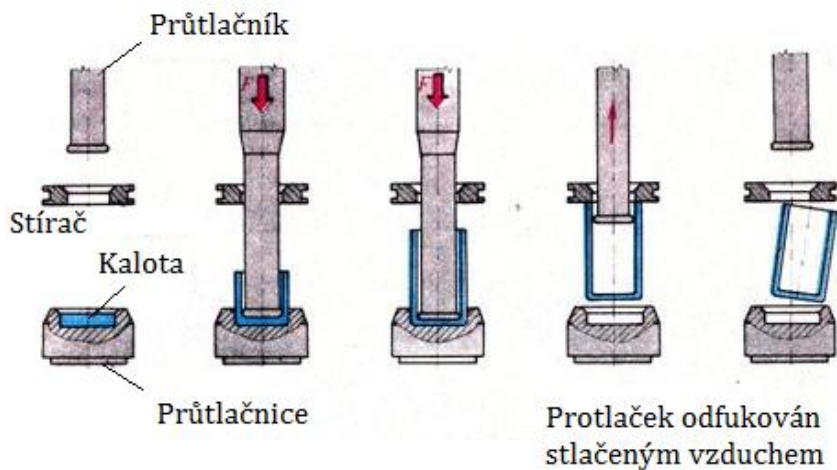
Protlačování je technologie, kterou lze provádět za studena, poloohřevu, nebo za tepla. Tvářený materiál se přemísťuje a jeho směr pohybu je určen konstrukcí nástroje - protlačovadla. Konečný výrobek se nazývá protlaček. Principem protlačování je deformace materiálu v důsledku působících sil do předem stanoveného směru s konečnými výhodnými mechanickými a rozměrovými vlastnostmi konečného výrobku. Přesnost protlačků je obvykle velmi vysoká a také využití materiálu je 90 až 100 %.

Protlačování lze provádět za účelem dosažení konečných výrobků nebo polotovarů, jako jsou trubky, tyče, profily apod.

Protlačování dělíme podle směru pohybu materiálu a nástroje na:

- Dopředné
- Zpětné
- Kombinované
- Stranové [25]





Obr. 12 -Schéma protlačování. [25]

## 2.7 Tvařitelnost

Tvařitelnost je schopnost tvářeného tělesa plasticky se deformovat za určitých podmínek tváření do porušení soudržnosti. Tvařitelnost tedy vychází ze základní charakteristiky tvářeného kovu nebo slitiny - plastičnosti. Uvažuje dále konkrétní rozměry, tvary tělesa a obecné podmínky tváření. [7]

## 2.8 Metody zjišťování deformace

Metody zjišťování deformace se kromě jiných dělí do těchto základních skupin:

- Zkoušky nedestruktivní<sup>6</sup>
- Zkoušky destruktivní
- Mechanické zkoušení
- Metalografické vyhodnocování

V kapitole 2.7.1 jsou rozepsány zkoušky, kterými se zjišťují pouze mechanicko-fyzikální vlastnosti, eventuálně technologické charakteristiky. Ostatní zkoušky jsou z důvodu nepřímé souvislosti s prací vynechány.

---

<sup>6</sup> O nedestruktivních metodách je blíže pojednáno v kapitole 3) Úvod do metod NDT.

### 2.8.1 Zkoušky destruktivní<sup>7</sup>

Zkoušky destruktivní spočívají v tom, že materiál je pro zjištění jeho vlastností deformován určitým nástrojem či zařízením, v závislosti na typu zkoušky. Materiál může být namáhán na tah, tlak, krut, stříh a ohyb. V praxi nepůsobí tato jednotlivá namáhání samostatně, ale v různých kombinacích. Materiál je vystaven složenému namáhání.

Základní rozdělení: zkoušky statické, zkoušky dynamické, zkoušky technologické.

#### a) Zkoušky statické

Způsob statických zkoušek předpokládá působení stálých nebo pomalu spojitě se měnících sil. Zkušební těleso se většinou zatěžuje jen jednou a to až do porušení.

Zkoušky dělíme podle způsobu zatížení následovně:

- Tahová zkouška
- Tlaková zkouška
- Stříhová zkouška
- Ohybová zkouška
- Zkouška na krut

#### b) Zkoušky dynamické

- Zkouška rázem - Charpyho kladivo
- Zkouška únavy
- Zkouška tečení a relaxace
- Zkouška tvrdosti - podle Brinella, Rockwella, Vickerse

#### c) Technologické zkoušky

- Zkoušky za tepla
- Zkoušky za studena
- Zkoušky tenkých plechů
- Zkoušky drátů
- Zkoušky trubek [4]

### 2.8.2 Metalografické vyhodnocování

Při metalografickém vyhodnocování deformačního zpevnění se sleduje změna hranic zrn vlivem deformace.

---

<sup>7</sup> Podrobný popis nejčastěji používaných destruktivních zkoušek přesahuje rámec tohoto textu a proto je zde pouze základní rozdělení.

Protože se během plastické deformace mění tvar zkušební tělesa, musí se měnit i tvar zrna ve struktuře. Tvarová změna jednotlivých zrn musí být taková, aby nedocházelo během deformace ke vzniku dutin, případně trhlin uvnitř materiálu. Taková tvarová změna zrna skluzovým mechanismem je možná pouze tehdy, jestliže krystalová mřížka obsahuje nejméně pět nezávislých skluzových systémů.

Na základě obecných experimentálních zkoušek bylo zjištěno, že velikost zrna (charakterizovaná středním průměrem  $d$ ) má rozhodující vliv na deformační napětí. Čím menší je velikost zrna, tím je vyšší hodnota deformačního napětí. Tento vztah se označuje jako Hall-Patchův.

Povrch vzorků kovů nebo jejich slitin, používaných při hodnocení elastických a plastických vlastností kovů, vznikl převážně třískovým obráběním. Jen nepatrná část vzorků má na povrchu přirozenou licí kůru. Povrchová zrna, která jsou plasticky deformována, bývají prostoupena různě rozsáhlou sítí trhlin, vrubů a mikrovrubů, popř. povrch zrna se mění chemicky, například tvorbou přirozených ochranných vrstev. Rozsáhlé makroskopické i mikroskopické změny povrchových zrn značně zvyšují povrchovou energii, která může dosáhnout vyšších hodnot, než jakou má hranice krystalů. [24], [27]

### 3 Úvod do metod NDT

Nedestruktivní zkoušky materiálů slouží ke zjišťování vad (povrchových nebo objemových) na základě určitých fyzikálních principů.

Mezi základní nedestruktivní zkoušky patří:

- Vizuální zkoušky
- Kapilární zkoušky
- Zkoušky magnetické a elektrické
- Zkoušky vířivými proudy
- Zkoušky ultrazvukem
- Zkoušky akustické
- Prozařovací zkoušky

#### 3.1 Vizuální zkoušky

Vizuální kontrola je nedestruktivní zkušební technika, která poskytuje prostředky pro zjišťování a zkoumání různých povrchových vad, jako je koroze, znečištění, povrchová úprava a povrchové nespojitosti (například svary, těsnění, pájené a lepené spoje). Vizuální kontrola je nejpoužívanější metodou pro zjišťování a zkoumání povrchových trhlin, které jsou obzvláště důležité ve vztahu k mechanismu strukturální poruchy. I když jsou používány jiné

nedestruktivní techniky k detekci povrchových trhlin, vizuální kontrola často poskytuje užitečný doplněk. Například, když se provádí na principu vířivých proudů zkoumání vad potrubí, vizuální kontrola se často provádí za účelem ověření a bližšího přezkoumání povrchového narušení.

Vizuální kontrola se provádí převážně pouhým okem, nebo pomocí zařízení jako jsou např. interferenční mikroskopy pro měření hloubky rýh v materiálu s broušeným povrchem. Mezi zařízení pomáhající vizuální kontrole patří:

- Flexibilní nebo pevné boroskopy pro osvětlování a pozorování vnitřních, uzavřených, nebo jinak nepřístupných oblastí
- Obrazové senzory pro dálkové snímání a obrazové záznamy ve formě fotografií nebo videozáznamů
- Barviva a fluorescenční penetrační a magnetické částice pro zvýšení pozorování povrchových trhlin
- Lupa, svítilna, metr apod.

Vizuální kontrolu nelze aplikovat pro detekci deformačního zpevnění materiálu. [1]

### 3.2 Kapilární zkoušky

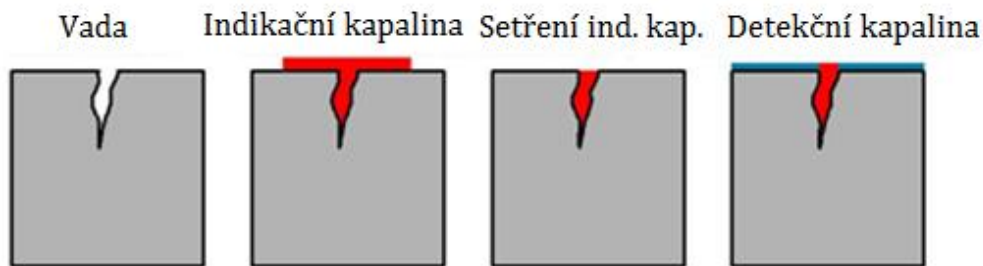
Kapilární zkouška je druh nedestruktivního zkoušení materiálu, který odhaluje vady spojené s povrchem.

Fyzikální princip spočívá ve vzlínání kapaliny. Souvislá vrstva indikační kapaliny je nanese na povrch materiálu. Indikační kapalina zatéká do trhlin, mnohdy neviditelných pouhým okem. Následně je přebytečná indikační kapalina z povrchu odstraněna a nanese detekční kapalina. Pokud má zkoumaný předmět trhliny, začne po nějaké době detekční kapalina vzlínat směrem vzhůru a vytvoří tak obraz vady. Schopnost detekční kapaliny vystoupit na povrch závisí na následujících faktorech:

- Čistota povrchu
- Konfigurace nečelistvosti
- Velikost plochy nečelistvosti
- Povrchové napětí kapaliny
- Kontaktní úhel kapaliny

Tato metoda je vhodná pro široké spektrum velikostí vad, bez ohledu na jejich orientaci. Kapilární zkouška je vhodná především pro povrchové trhliny a nevhodná pro porézní materiály.

Metoda je využívána pro kontrolu tvářených a litých výrobků železných i neželezných kovů, keramiky, plastů a skleněných předmětů. Metoda je využívána pro její operativnost a všestrannost. [1]



Obr. 13 - Schéma kapilární zkoušky. [28]

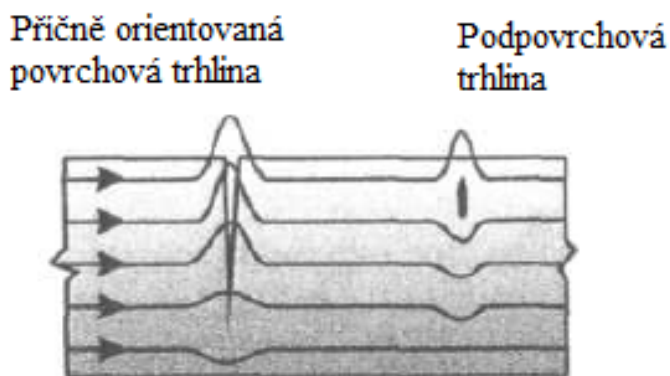
### 3.3 Zkoušky magnetické a elektrické

Zkoušky se dělí na:

- Magnetické
- Indukční

#### 3.3.1 Zkoušky magnetické

Jednou z nejpoužívanějších zkoušek pro zjišťování povrchových vad u polotovárů a výrobků z feromagnetických materiálů je magnetická prášková zkouška. Touto zkouškou se zjišťují převážně vady související s povrchem (trhliny nebo studené spoje ve svarech) a případně i vady, které jsou těsně pod povrchem zkoušeného materiálu. Detekci vady způsobuje změna magnetického toku ve zmagnetovaném materiálu tím, že podstatně zvyšuje magnetický odpor. V místě vady tak dochází ke zhuštění a zakřivení magnetických siločar, z nichž část vystupuje na povrch a tím vzniklý rozptylový tok vytvoří na obvodu vady magnetické póly. Nejvíce rozptýlený magnetický tok je u vad, které vystupují na povrch a rychle klesá se vzdáleností vady od povrchu (viz obr. 14).



Obr. 14 - Rozptylové magnetické pole nad defektem. [30]

### 3.3.2 Zkoušky indukční

Jedna z možností indikace vad pomocí této metody je indikace vad na základě rozptylového pole ve zmagnetovaném předmětu. Rozptylové pole se u této metody zjišťuje tak, že elektromagnetické snímače se pohybují nad povrchem zkoušeného materiálu a změny magnetického pole se zachycují a mění se na elektrické impulsy, které se registrují. Vady jsou tak detekovány díky různému toku magnetických siločar. [5]

Tyto zkoušky jsou vhodné pro plynulou kontrolu. Lze jimi detekovat především povrchové vady hutních výrobků kruhového průřezu, jako jsou dráty, trubky, nebo tyče.

Indukční zkoušky se využívají v sériové i hromadné výrobě a také jako mezioperační kontrola. Jejich hlavním významem je, že zajišťují včasné odhalení a průkazné zjištění skrytých vad již během výrobního procesu, což umožňuje vyřazení vadných součástí a tím ušetření dalších výrobních operací, jejichž náklady často mnohonásobně převyšují cenu vyřazené vadné součásti.

V technické praxi se zejména používají dvě indukční metody:

- Indikace vad na základě rozptylového pole ve zmagnetovaném předmětu
- Indikace vad pomocí vířivých proudů

Indukční metoda je vhodná pouze pro feromagnetické materiály a lze pomocí této metody detekovat deformační zpevnění materiálu. [1]

## 3.4 Zkoušení vířivými proudy<sup>8</sup>

### 3.5 Zkoušky ultrazvukem

Zkouška ultrazvukem je metoda, ve které jsou vysokofrekvenční zvukové vlny zavedeny do materiálu pro detekci povrchových a podpovrchových vad. Zvukové vlny prochází materiálem s určitými ztrátami energie a odráží se v rozhraní. Odraz je poté zobrazen a analyzován k definování přítomnosti vady a její polohy.

Stupeň odrazu závisí do značné míry na fyzickém stavu těchto materiálů, které tvoří rozhraní, a v menší míře na specifických fyzikálních vlastnostech materiálu. Úplný odraz nastává při rozhraní kov/plyn. Částečný odraz pak při rozhraní kov/tekutina nebo kov/pevné rozhraní.

Touto metodou také lze zjišťovat tloušťku známého materiálu (např. trubky, plechy atd.). Metodu je možné využít také pro detekci deformačního zpevnění. [1]

---

<sup>8</sup> O vířivých proudech a zkoušení pomocí vířivých proudů je podrobně pojednáno v kapitole 4) Vířivé proudy

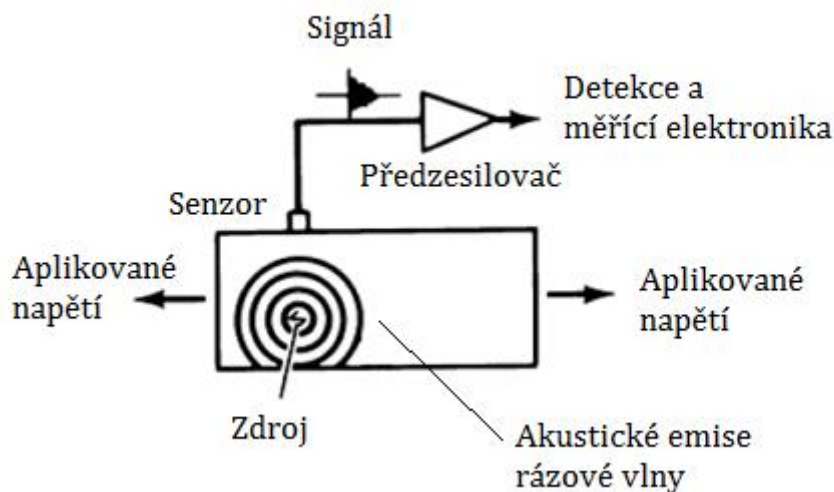
### 3.6 Zkoušky akustické

Důležitým pojmem akustických zkoušek jsou akustické rázové vlny, produkované náhlým pohybem v mechanicky zatěžovaných materiálech. Nejběžnějšími zdroji akustických rázových vln jsou vady související s deformačními procesy, jako např. růst trhlin a plastická deformace. Proces generování a detekce je znázorněn na obr. 15.

Rázová vlna produkovaná náhlým pohybem vyzařuje do struktury a dává signál citlivému piezoelektrickému měniči. Se zvyšujícím se napětím v materiálu dochází ke zvyšování generování akustické emise. Signály z jednoho nebo více senzorů jsou zesíleny a měřeny za účelem získání údajů pro displej a interpretaci.

Akustické zkoušky jsou vhodné pro:

- Kontrolu svaru
- Detekci doteku nástroje a opotřebení nástroje při automatickém obrábění
- Detekci opotřebení v rotačních zařízeních vlivem ztráty mazání
- Detekci a monitorování netěsnosti
- Monitorování chemických reakcí, včetně korozních procesů [1]



Obr. 15 - Schéma akustické zkoušky. [1]

### 3.7 Zkoušky prozařovací

Prozařovací zkoušky využívají některé fyzikální vlastnosti ionizujícího elektromagnetického záření. Pomocí tohoto záření se vnitřní defekty dají zviditelnit v jejich reálné podobě a mohou se dokumentačně zaznamenat pro potřeby vyhodnocení.

U prozařovacích zkoušek se využívají ty druhy elektromagnetického záření, které mají přímé nebo nepřímé ionizační účinky. Jedná se o tato záření:



- Rentgenové
- Radioaktivní
- Neutronové

Podle druhu použitého záření se prozařovací zkoušky rozdělují do těchto skupin:

- Rentgenová defektoskopie
- Gama defektoskopie
- Betatronová defektoskopie
- Neutronová defektoskopie

### 3.7.1 Rentgenové záření

Rentgenové záření vzniká při prudkém zabrzdění rychle letících elektronů. Elektrony emitované žhavenou katodou jsou urychlovány potenciálním rozdílem mezi anodou a katodou, dále dopadají na anodu, odkud se šíří rentgenové záření. Část kinetické energie elektronů se nepřeměňuje v záření, ale v teplo, a tím se zahřívá anoda.

Rozdělení rentgenového záření podle vlnové délky, případně podle energie záření:

- Dlouhovlnné
- Krátkovlnné
- Velmi krátkovlnné

### 3.7.2 Gama záření

Záření  $\gamma$  vzniká při rozpadu jader radioaktivních prvků. Pro účely radiografie se používají přirozené i umělé radioaktivní zářiče. Ty pracují v oblasti krátkovlnného až velmi krátkovlnného záření. Proto je možné záření  $\gamma$  používat pro větší tloušťky materiálů. Citlivost při zkouškách za použití  $\gamma$  záření je menší, než při použití rentgenového záření.

### 3.7.3 Betatronové záření

Betatron je urychlovač elektronů, které se urychlují magnetickým polem na kruhové dráze o konstantním poloměru. Když takto urychlené elektrony dopadnou na anodu, vzniká záření o velmi malé vlnové délce - betatronové záření.

### 3.7.4 Neutronové záření

Neutronová defektoskopie používá k prozáření materiálu svazek neutronů. Aplikace neutronů je podmíněna vhodným zdrojem. Kromě jaderných reaktorů je možno jako zdroje neutronů využít i spontánního radioaktivního rozpadu izotopu  $^{252}\text{Cf}$ . [5]



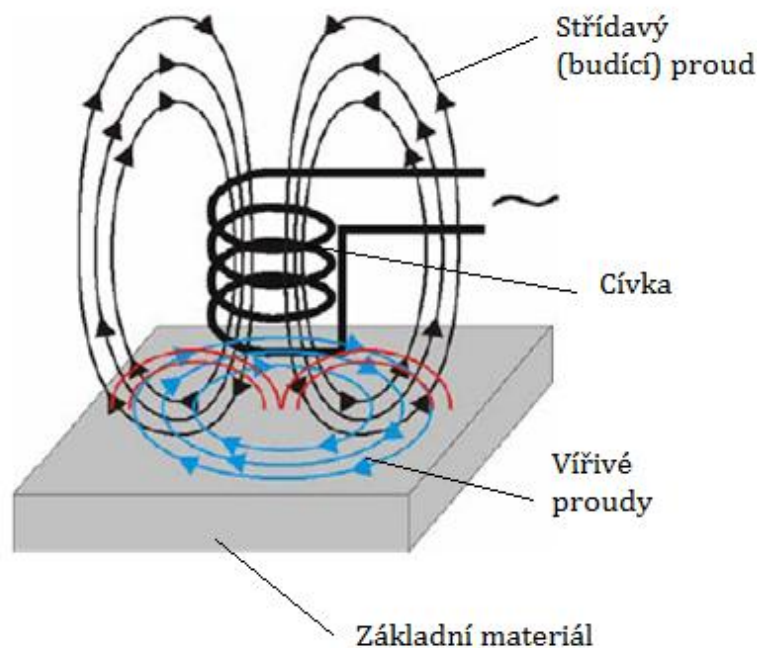
## 4 Vířivé proudy

### 4.1 Základní fyzikální princip

Vířivé proudy jsou založené na principu elektromagnetické indukce. Součást, která má být kontrolována je v blízkosti elektrické cívky, kterou protéká střídavý proud. Tento střídavý, tzv. budící proud indukuje na povrchu materiálu vířivé proudy, které obíhají v kontinuálních kruhových drahách. Podle toho, o jaký materiál se jedná, se toto zpětně projeví na změně elektrického napětí na cívce.

Vířivé proudy a jejich rozsah závisí na:

- Budícím poli způsobeným budícími proudy
- Elektrických vlastnostech zkoušeného materiálu
- Elektromagnetickém poli, vyvolaným tokem proudů v rámci zkoušeného materiálu [1], [4], [17], [14]



Obr. 16 - Vířivé proudy.[14]

### 4.2 Zkoušení materiálu pomocí vířivých proudů

Metodu zkoušení materiálu vířivými proudy lze aplikovat na feromagnetické i neferomagnetické materiály. Zkoušený materiál však musí být elektricky vodivý.

U feromagnetických materiálů se musí snížit vliv elektrické vodivosti povrchových vrstev. Provádí se to tak, že materiál, u kterého se zjišťuje vada, se zmagnetuje silným polem magnetu až do nasycení, kdy má nízkou permeabilitu.

Sonda se pohybuje směrem k povrchu a následně na povrchu zkoumaného materiálu. Trhlina je indikována na měřicím přístroji a akustickým signálem ve sluchátkách. Metoda umožňuje zkoušet i materiály s nátěrem nebo izolací, pokud je vrstvička konstantní tloušťky.

Zkouška vířivými proudy může být použita pro:

- Měření a stanovení vlastností materiálů jako je elektrická vodivost, magnetická permeabilita, velikost zrna, stav tepelného zpracování, tvrdost, geometrické rozměry součástí
- Kontrolu trhlin podpovrchových, kontrolu dutin - touto metodou je možné detekovat podpovrchové trhliny do hloubky cca 20 mm<sup>9</sup>
- Rozřazení kovů - detekce rozdílů v chemickém složení a mikrostrukturu zkoušených materiálů

Vzhledem k faktu, že vířivé proudy jsou vytvořeny elektromagnetickou indukcí, kontrolní metoda nevyžaduje přímý kontakt s kontrolovanou částí. Metoda vířivých proudů je tedy adaptabilní i pro vysokorychlostní kontrolu. To je její velká výhoda oproti jiným NDT metodám. Metoda vířivých proudů je založena na nepřímém měření a musí být pečlivě a opakovaně stanovena korelace mezi odečty přístrojů a strukturálními charakteristikami.

### 4.3 Výhody a omezení zkoušky vířivými proudy

Kontrola vířivými proudy je velmi univerzální. Tato metoda může být použita pro kontrolu vad materiálů za předpokladu, že fyzikální požadavky na materiál jsou kompatibilní s metodou kontroly.

Výhodou je, že v porovnání například s metalografickým vyhodnocováním je metoda vířivých proudů mnohem rychlejší. Metoda je ale také velmi citlivá na mnoho vlastností spojených s materiálem. Proto je někdy použití této metody nevýhodné. Některé proměnné materiálové charakteristiky mohou zapříčinit chybu měření a to tím, že dojde k výraznému ovlivnění signálu.

Vířivé proudy tvoří v porovnání s magnetickou zkouškou své vlastní elektromagnetické pole, které může být snímáno buď prostřednictvím účinků pole na primární budicí cívce, nebo prostřednictvím nezávislého senzoru. V neferomagnetických materiálech je sekundární elektromagnetické pole získáno výhradně z vířivých proudů. U feromagnetických materiálů se objevují další magnetické účinky, které jsou obvykle dostatečné velikosti, aby zastínily účinky pole způsobené indukovanými vířivými proudy.

---

<sup>9</sup> Tuto obecnou hodnotu uvádí odborná literatura. Přirozeně se tato hodnota liší v závislosti na zkoušeném materiálu.

Výhody použití metody vířivých proudů:

- Citlivost na malé trhliny a další defekty
- Odhalování povrchových a podpovrchových vad
- Zkoumání dává okamžité výsledky
- Možnost vyšetření složitých tvarů
- Minimální potřebná příprava vzorků
- Testovací sonda nepotřebuje přímý kontakt se součástí
- Vybavení je přenosné

Omezení použití metody vířivých proudů:

- Lze vyšetřovat pouze elektricky vodivé materiály
- Sonda musí mít dostatečný přístup k povrchu
- Je nutná určitá zručnost a zaškolení
- Konečná úprava povrchu není žádoucí
- Potřeba nastavení pomocí etalonu
- Hloubka vniku je omezená
- Nelze zjistit vady, které jsou orientovány v určitém směru [17]

## 4.4 Měřicí sondy a jejich typy

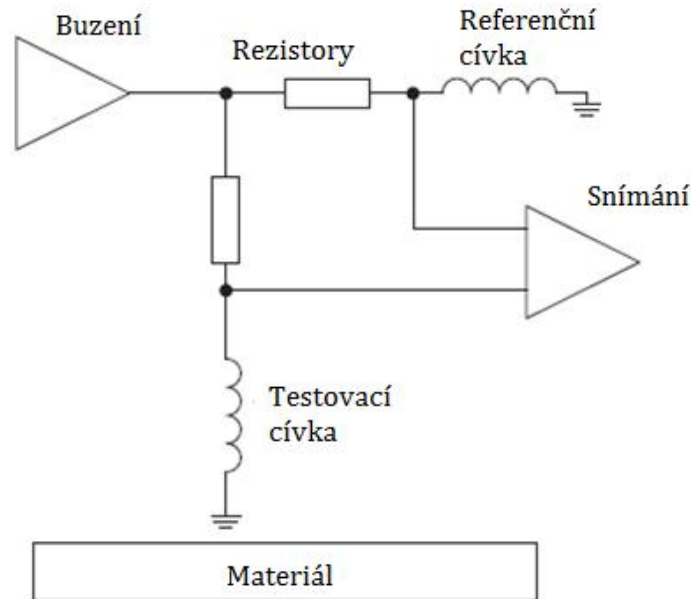
Pro měření vířivých proudů lze využít různé typy měřicích sond, které se dělí podle druhu provozního použití. V základu se rozlišují čtyři typy sond:

- Absolutní
- Diferenční
- Reflexní
- Hybridní

### 4.4.1 Absolutní sondy

Absolutní sondy obsahují pouze jednu testovací cívku, která je použita pro generování vířivých proudů i snímání sekundárního pole v materiálu. Protože vířivé proudy vytvořené vlivem magnetického pole cívky mají opačnou fázi pole a působí proti poli budícímu, je ovlivněna induktivní reaktance budící cívky. Vytváření vířivých proudů tedy ubírá energii budící cívky a dochází ke vzrůstu jejího elektrického odporu. Pokud jsou tedy měřeny absolutní změny impedance cívky, výsledkem je informace o stavu zkoušeného materiálu.

Tyto sondy se používají pro zjišťování vad materiálů a k měření tloušťek povlaků. Je možné je vhodně přizpůsobit různým potřebám měření. Zapojení sondy viz obr. 17.

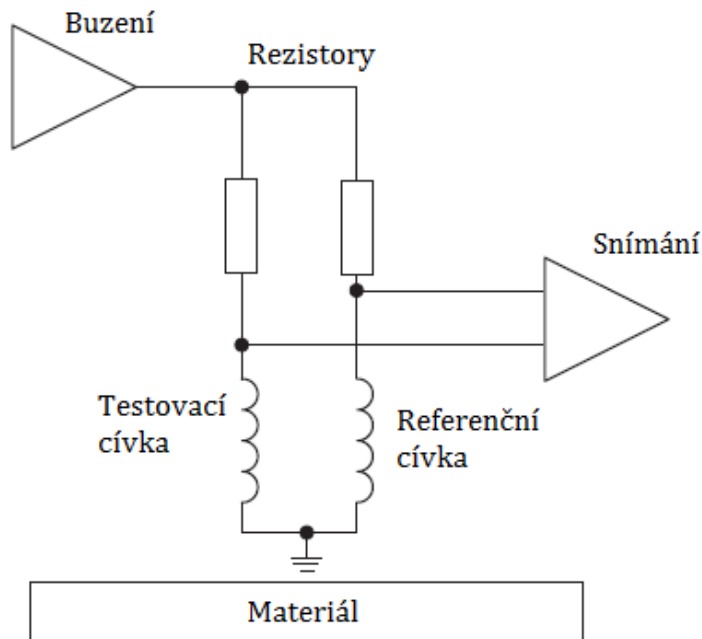


Obr. 17 - Schéma absolutní sondy. [14]

#### 4.4.2 Diferenční sondy

Oproti absolutním sondám obsahují diferenční sondy dvě budící cívky. Ty jsou vinuty se vzájemnou protifází a jsou umístěny v určité vzdálenosti od sebe. Při pohybu po materiálu se obě cívky chovají rozdílně. Pokud se nachází v místě, kde je materiál bez vady, je jejich rozdílné působení minimální a diference tedy velice malá. Pokud ovšem nastane situace, kdy jedna cívka bude umístěna v pozici nad vadou a druhá cívka bude na místě materiálu bez vady, výsledkem bude rozdílné působení na obou cívkách. Sledováním této diference je možné odhalit vady v materiálu.

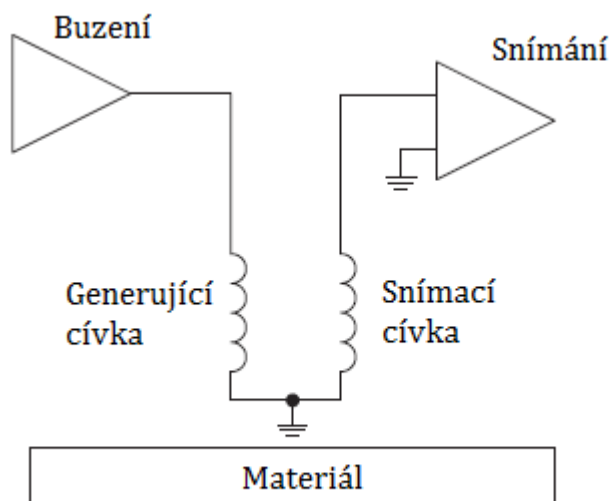
Mezi výhody této sondy patří malá citlivost na okolní vlivy (například oddálení a teplotu) a vysoká citlivost na přítomnost vady. Tato sonda má ovšem, z principu jejího fungování, jednu nevýhodu. Jestliže materiál obsahuje defekt, který je delší než vzdálenost mezi cívkami, dojde k tomu, že při pohybu cívek po materiálu bude zaznamenán jen začátek a konec defektu. Prostřední část vady bude mít velice malou diferenci na obou cívkách, protože obě cívky sledují stejnou vadu. I přesto jsou tyto sondy velice často v průmyslu používány z důvodu jednoduché detekce a praktické odolnosti této sondy. Zapojení je zobrazeno na obr. 18.



Obr. 18 - Schéma diferenční sondy. [14]

#### 4.4.3 Reflexní sondy

Konstrukce reflexní sondy je podobná té diferenční. Obsahuje dvě cívky s tím rozdílem, že jedna cívka je použita pro generování vířivých proudů a druhá ke snímání změn v materiálu. Výhodou tohoto řešení je možnost vysoké citlivosti, kdy budící cívka vytváří silné pole v okolí cívky měřicí. Pokud bude mít měřicí cívka vysokou citlivost, výsledkem budou velice přesné výsledky o stavu materiálu. Zapojení sondy viz obr. 19.



Obr. 19 - Schéma reflexní sondy. [14]

#### 4.4.4 Hybridní sondy

Hybridní sondy jsou používány a navrženy pro řešení konkrétní problematiky. Nejčastěji pro zvláštní testovací aplikace na specifických materiálech. Sonda bývá v tomto případě navržena kombinovaně a obsahuje v sobě několik jiných typů sond. Takovéto sondy nejsou příliš univerzální a je vhodné je použít pouze v případě testování konkrétní vady. Tu však detekují s vysokou přesností. [14]

#### 4.4.5 Nejčastěji používané sondy<sup>10</sup>

Sondy Olympus:

- Rotační sondy skeneru
- Ruční sondy roztečné
- Povrchové sondy
- Bodové sondy
- Svarové sondy
- Posuvné sondy [24]

### 4.5 Nové trendy ve zkoušení materiálu vířivými proudy

#### 4.5.1 Eddy Current Array

Tato metoda využívá uspořádání sond nejčastěji do matice. Pole se však může uspořádat i do profilu měřeného povrchu. Každou cívkou je pak možno ovládat zvlášť. Tato metoda se využívá především při kontrole velkých ploch (např. v leteckém průmyslu), kde by kontrola jedinou sondou byla příliš zdlouhavá. Výstupem zkoušky nejsou pouze křivky a poloha koncových bodů jako u klasického zkoušení vířivými proudy, výstup je i obrazový.

Výhody oproti klasické sondě:

- Výrazné urychlení kontroly
- Kontrola velké plochy při jednom průchodu
- Srozumitelnější interpretace výsledných dat
- Vyšší spolehlivost a pravděpodobnost odhalení vady [16]

---

<sup>10</sup> Přehled sond od firmy Olympus je zde pro představu a ukázkou užití v praxi. Proto nejsou sondy blíže popsány.

#### 4.5.2 Metoda INCOTEST<sup>11</sup>

Tato metoda slouží ke zjišťování korozního napadení objektů pro uskladnění a transport nebezpečných látek.

Metoda je založená na měření tloušťky ocelových potrubí a nádob pomocí pulsních vířivých proudů. Výhodou je, že metoda umožňuje měřit bezkontaktním způsobem i přes izolaci a to za plného provozu. Základem je působení nízkofrekvenčního jednosměrného magnetického pole, které generuje v objektu vířivé proudy. Magnetické pole působí předepsaný čas a po jeho vypnutí zaniknou i generované vířivé proudy, jejichž trvání a sílu ovlivňuje tloušťka stěny. Působením těchto vířivých proudů a porovnáním s kalibrovaným signálem s obdobnou vodivostí a permeabilitou, je možno určit průměrnou tloušťku stěny právě v oblasti působení přiloženého magnetického pole.

Specifikace metody INCOTEST:

- Přenosné zařízení
- Snímače pracují až do vzdálenosti 25-30 metrů od řídicí jednotky
- Měření tloušťky od 6 do 65 mm, při izolaci do 100 až 150 mm
- Přesnost  $\pm 5 \%$

Výhody:

- Použití při měření zaizolovaných materiálů, pokrytých určitou vrstvou či povlakem
- Není nutná úprava povrchu
- Měření při teplotách povrchu do 400 °C

Nevýhody:

- Lze zjistit pouze průměrnou hodnotu koroze v místě měření
- Nelze zjistit důlkovou korozi [1]

## 5 Změna vlastností materiálů v důsledku deformačních procesů

Působením vnějších sil se materiál deformuje, nebo překročí-li síla určitou mez, porušuje. Toto chování je výsledkem vzájemného působení vnějších sil s vnitřními v zatěženém tělese, které deformaci nebo porušení tuhé látky brání. Odpověď materiálu na zatěžující sílu je v různých případech rozdílná. Záleží na vlastnosti materiálu, velikosti síly a podmínkách zatěžování.

---

<sup>11</sup> Českým ekvivalentem pro metodu INCOTEST jsou pulsní vířivé proudy.

V první oblasti deformačního diagramu způsobí velký vzrůst napětí jen velmi malou deformaci, která po odlehčení vymizí. Jedná se tak o pružnou deformaci, která nezpůsobuje deformační zpevnění. V druhé oblasti naopak způsobí malý přírůstek napětí značný růst deformace, která po odlehčení nevymizí. Jde tedy o deformaci plastickou a dochází tak v případě nepřítomnosti uzdravovacích procesů k deformačnímu zpevnění.

Je zřejmé, že strojní součásti a konstrukce mohou pracovat pouze za podmínek odpovídajících první oblasti diagramu - pružné deformaci. Vlastnosti a chování materiálů v této oblasti mají proto především význam pro hodnocení jeho konstrukčních vlastností a jsou rozhodující pro pevnostní výpočet součástí.

Chování materiálu, charakterizující druhou oblast je naopak rozhodující pro některé výrobní pochody, při nichž se dodává součásti požadovaný tvar. Tato část diagramu poskytuje tedy cenné informace a technologické podklady, zejména pro tváření. [19]

Tváření za studena je vždy doprovázeno intenzivním zpevňováním materiálu - růstem meze kluzu a pevnosti (mez kluzu se přibližuje mezi pevnosti). Schopnost kovů plasticky se deformovat je složitou funkcí minimálně těchto faktorů:

- Chemického složení
- Metalurgické struktury, jíž bylo dosaženo během výrobního procesu a následujícího tepelného a mechanického zpracování
- Teploty během procesu tváření
- Rychlosti deformace
- Stavů napjatosti
- Způsobu dosažení deformace - tzv. historie zatěžování

Závislost plasticity na historii zatěžování vede k tomu, že pro reálné tvářecí pochody neexistuje žádné analytické řešení. Proto se musí přistoupit k experimentálnímu nebo numerickému řešení, založenému na idealizovaném materiálu, který je obvykle definován křivkou závislosti efektivního napětí (intenzity napětí) na efektivní deformaci (intenzitě deformace), tj. křivkou zpevňování na mezi kluzu (flow-stress).

### **Stupeň zpevnění - efektivní napětí**

Efektivní napětí vyjadřuje současný účinek jednotlivých složek stavu napjatosti v určitém bodě tělesa. Geometricky posuzováno je to výsledný vektor napětí, který je přímo vektorovým součtem hlavních normálových napětí v oktaedrické rovině. Velikost efektivního napětí je možné počítat jak z hlavních normálových, tak z hlavních tangenciálních napětí.

Po nezbytných matematických úpravách platí tento vztah:

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} \quad (1)$$

kde  $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$  označují hlavní napětí.



Energetickou podmínku plasticity je možné odvodit na základě úvahy o energii, potřebné na uskutečnění deformačního procesu. Podle této hypotézy přechod tělesa do plastického stavu nezávisí na druhu napjatosti, ale nastává tehdy, když energie, vyvozená napjatostí, dosáhne určité velikosti. Přitom potenciální energie změny tvaru tělesa, připadající na jednotku tvářeného objemu, závisí pouze na vlastnostech materiálu a má pro něho stálou hodnotu.

Poté platí:

$$\sigma_{ef} = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]} = K \quad (2)$$

kde K je konstanta plasticity pro daný materiál s ohledem na teplotu a rychlost deformace. [20]

## 6 Praktické využití metody vířivých proudů

Nejběžnějšími oblastmi, kde jsou metody vířivých proudů používány, jsou letecký, automobilový a hutní průmysl.

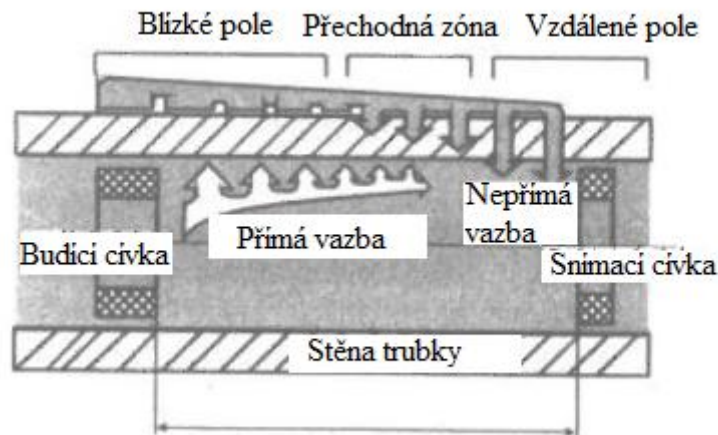
### Metoda vzdáleného pole

Princip metody je zobrazen na obr. 20. Sonda RFEC (Remote Field Eddy Current) se skládá z budící a snímací cívky, které jsou umístěny v určité vzdálenosti od sebe. Tato metoda se používá především pro kontrolu trubek. Sonda se vloží do trubky a budící cívka je napájena střídavým proudem, který vybudí elektromagnetické pole kolem budící cívky. Toto primární pole způsobuje, že ve stěnách trubky se naindukují vířivé proudy, které vytvoří své vlastní (sekundární) pole, které působí nejen proti primárnímu, ale působí i vně trubky. Toto pole je mnohem slabší než primární a má významný fázový posuv. Vznikají dvě hlavní oblasti. Oblast blízkého pole a oblast vzdáleného pole.

Oblast blízkého pole se vyskytuje v oblasti budící cívky, kde je nejsilnější. V určité osově vzdálenosti od budící cívky se nachází oblast, kdy sekundární pole je silnější než pole od budící cívky. Tato oblast se nazývá vzdálené pole. Oblast mezi blízkým a vzdáleným polem se nazývá přechodná zóna.

Mezi budící a snímací cívkou existují dvě dráhy toku energie. První je tzv. přímá vazba, při níž energie pochází přímo z budící cívky do snímací cívky. Naproti tomu nepřímá vazba, při níž energie projde dvakrát stěnou trubky. Nejdříve stěnou ven a následně se vrátí zpět. Pokud se v této dráze nachází vada, lze ji detekovat pomocí změny vzdáleného pole. Výsledný signál má velmi nízkou napětěvou úroveň, která se nedá standardní přístrojovou strukturou zpracovat a zobrazit, proto se používají nízko-šumové předzesilovače, které se umísťují do konstrukce sondy. Mezi typické aplikace v letectví patří například

kontrola feromagnetických nýtových spojů a jiných vícevrstvých oblastí na draku letounu.  
[27]



Obr. 20 - Schéma metody vzdáleného pole. [27]

Pro kontrolu materiálů metodou vířivých proudů jsou v praxi používány nejčastěji tyto přístroje a prvky:<sup>12</sup>

- Absolutní sondy
- Diferenciální sondy
- Etalony a vzorky
- Multidiferenciální sondy
- Přenosné analogové přístroje
- Přenosné digitální přístroje
- Průchozí sondy
- Rotační sondy

Aplikace metod vířivých proudů v praxi:

- Automatická kontrola kol, ozubení a děr
- Ruční zkoušení turbínových lopatek
- Automatizovaná kontrola pístů
- Automatizovaná kontrola vačkových hřídelí [22]

<sup>12</sup> Tyto konkrétní přístroje a prvky využívá firma Advanced Technology Group s.r.o.

# **Experimentální část**

V této části bakalářské práce je podrobně popsán postup praktického řešení. Zkoušeny byly dva materiály - hliníková slitina EN AW-1090 a konstrukční ocel S235JR-C.

### **Hliníková slitina EN AW-1090**

Hliníková slitina EN AW-1090 s chemickým složením 99,9 % hliníku. Ostatními přídavnými prvky jsou křemík, železo, měď, mangan, měď, zinek, galium, vanad a titan. Polotovarem byla tažená tyč dle ČSN EN 1301-1 o průměru 25 mm.

### **Konstrukční ocel S235JR-C**

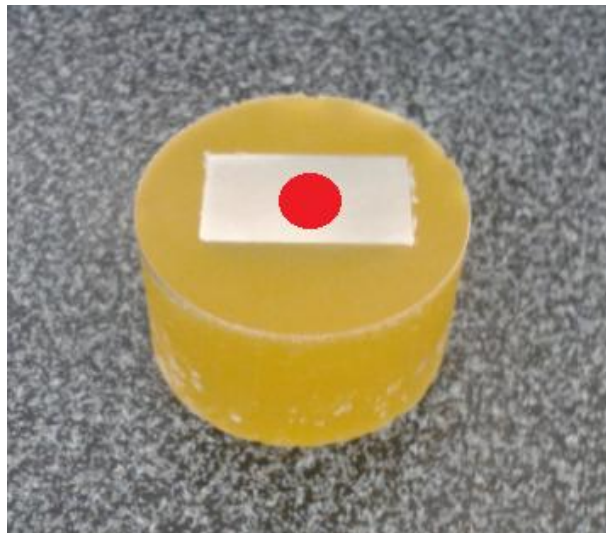
Konstrukční ocel S235JR-C s přídavnými prvky uhlík, fosfor, síra a dusík. Polotovarem byla válcovaná tyč dle ČSN 41 1375 o průměru 20 mm.

U vzorků z hliníkové slitiny se prováděla tato měření:

- měření tvrdosti dle Vickerse
- zjišťování deformace vířivými proudy
  - měření elektrické vodivosti
  - ověřování deformace absolutními sondami
- určování vnitřní deformace materiálu metodou simulace deformace
- metalografické vyhodnocení

U vzorků z oceli S235JR-C se prováděla stejná měření. Vynechána byla pouze simulace deformace.

Dle teorie tváření je největší deformace materiálu ve středové oblasti vzorku a proto byla všechna měření provedena právě tam (viz obr. 21).



**Obr. 21-** Vyznačení polohy, ve které byla prováděna všechna měření.

## 7.1 Hliníková slitina EN AW-1090

### 7.1.1 Příprava vzorků

#### Řezání vzorků

Výchozím polotovarem pro výrobu zkušebních vzorků byla hliníková tyč o průměru 25 mm. Pro potřebu testování bylo nařezáno celkem 18 válečků, 8 ks pro první sérii testů, 8 ks pro druhou a 2 válečky sloužily jako etalony.



Obr. 22 - Nařezané vzorky připravené k deformaci.

#### Deformace vzorků za studena

Vzorky byly deformovány na tahovém stroji DMG, nastaveném v režimu tlakového zkoušení. Každý vzorek byl deformován na jinou procentuální hodnotu stupně deformace<sup>13</sup>. Na obr. 23 jsou deformované vzorky s vyznačením příslušného stupně deformace.



Obr. 23 - Deformované vzorky 1. série.

---

<sup>13</sup> V odborné terminologii označováno jako stupeň přetvoření.

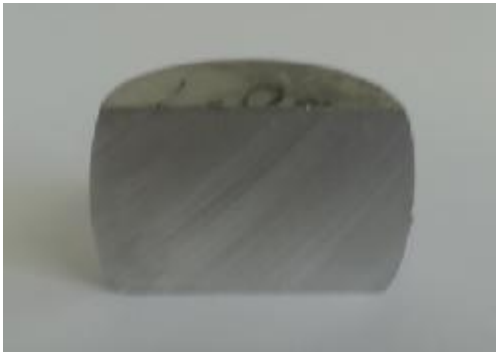
Stupeň deformace materiálu byl stanoven dle vzorce:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_u}{h_0} \cdot 100 [\%] \quad (3)$$

kde  $\varepsilon$  je poměrná deformace,  $h_0$  je výchozí výška a  $h_u$  je výška vzorku po deformaci.

### Řezání deformovaných vzorků

Pro potřeby měření byl proveden rozřez deformovaných vzorků - první série deformovaných vzorků příčně a druhá série podélně (viz obr. 24 a obr. 25). Pro účely měření byla důležitá především druhá série s podélným řezem. U takto rozříznutých vzorků bylo dle obecných zákonitostí tváření možné detekovat velké rozdíly v deformačním zpevnění v různých částech vzorku.



Obr. 24 - Podélný řez vzorku 2. série.



Obr. 25 - Příčný řez vzorku 1. série.

### Zalítí vzorků

Za účelem kvalitního vyhotovení metalografického výbrusu je důležité uchopení vzorků. Z toho důvodu se hůře uchopitelné vzorky zalévají do polymerové směsi. Vzorek uložený v pryžové či plastové formě se touto směsí zalije a následně tato směs přibližně 30 minut tuhne. Po uplynutí této doby se vzorek vyjme, očistí a je připraven k broušení.



Obr. 26 - Vzorek zalitý v pryžové formě polymerovou směsí.

## Broušení vzorků

Pro odstranění hrubého nerovného povrchu, způsobeného řezáním nebo zalitím vzorků, je nutné povrch vzorků metalograficky brousit. Tím je dosaženo požadovaného povrchu vzorků pro následná měření.

### 7.1.2 Měření tvrdosti dle Vickerse

Pro zjištění, zda se zvyšujícím stupněm deformace se materiál zpevňuje či ne, bylo provedeno měření tvrdosti dle Vickerse. Tvrdost je obecně určena poměrem vlačovací síly  $F$  a povrchu vtisku. Byly provedeny celkem tři vtisky ve středové oblasti vzorku na Vickersově tvrdoměru se zatížením 100 g. Výsledné hodnoty byly vypočteny automaticky softwarově.



Obr. 27 - Vickersův tvrdoměr.

V tab. 1 a tab. 2 jsou uvedeny hodnoty tvrdosti  $HV_{0,1}$  vzorků 1. a 2. série, včetně směrodatné odchylky.



Stupeň deformace [%]	1. hodnota [HV]	2. hodnota [HV]	3. hodnota [HV]	Průměrná hodnota [HV]	Směrodatná odchylka
nedeformovaný	28	29	29	28,6	0,47
5	30	31	31	30,6	0,47
6,5	33	32	32	32,3	0,47
10	35	33	30	32,6	2,05
20,5	41	36	43	40	2,94
28,5	40	43	40	41	1,41
42	43	44	45	44	0,82
55,5	48	48	45	47	1,41
68	49	48	46	47,6	1,25

Tab. 1 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV0,1 u 1. série vzorků.

Stupeň deformace [%]	1. hodnota [HV]	2. hodnota [HV]	3. hodnota [HV]	Průměrná hodnota [HV]	Směrodatná odchylka
nedeformovaný	25	26	26	25,6	0,47
5	28	29	29	28,6	0,47
6,5	32	33	32	32,3	0,47
10	36	33	35	34,6	1,25
20,5	36	34	38	36	1,63
28,5	39	38	40	39	0,82
42	45	49	39	44,3	4,1
55,5	42	44	38	41,3	2,5
68	42	47	49	46	2,94

Tab. 2- Naměřené hodnoty tvrdosti HV0,1 u 2. série vzorků.

### 7.1.3 Simulace deformace

Pro určení teoretického rozložení vnitřní deformace a její hodnoty ve středové oblasti vzorku byla provedena simulace deformace v programu Deform 2D, 3D. Tato metoda mimo jiné vypočítává i teoretické rozměry vzorků po deformaci, které odpovídají reálným naměřeným hodnotám.

Na obr. 28 je znázorněna simulace deformace vzorku 2. série se stupněm deformace 68 %. Hodnoty vnitřní deformace zobrazené na stupnici na obr. 28 vpravo jsou bezrozměrná čísla, která po přepočtu odpovídají procentuální hodnotě maximální vnitřní deformace v dané oblasti vzorku. Barevné rozložení je dáno různou hodnotou vnitřní deformace v jednotlivých oblastech vzorku. Modrá barva představuje nejnižší hodnotu vnitřní deformace a nejvíce červená naopak maximální vnitřní deformaci. Pro účely měření byla podstatná hodnota ze středu vzorku, neboť v této oblasti bylo prováděno měření deformací pomocí metody vířivých proudů. Dle obr. 28 je tato hodnota u takto deformovaného vzorku 1,36-1,52. Pro ukázkou přepočtu na procentuální hodnotu byla zvolena hodnota 1,45:



$$\ln \frac{h_0}{h_u} = 1,45$$

Hodnota  $h_u$  byla zvolena 1, tedy:

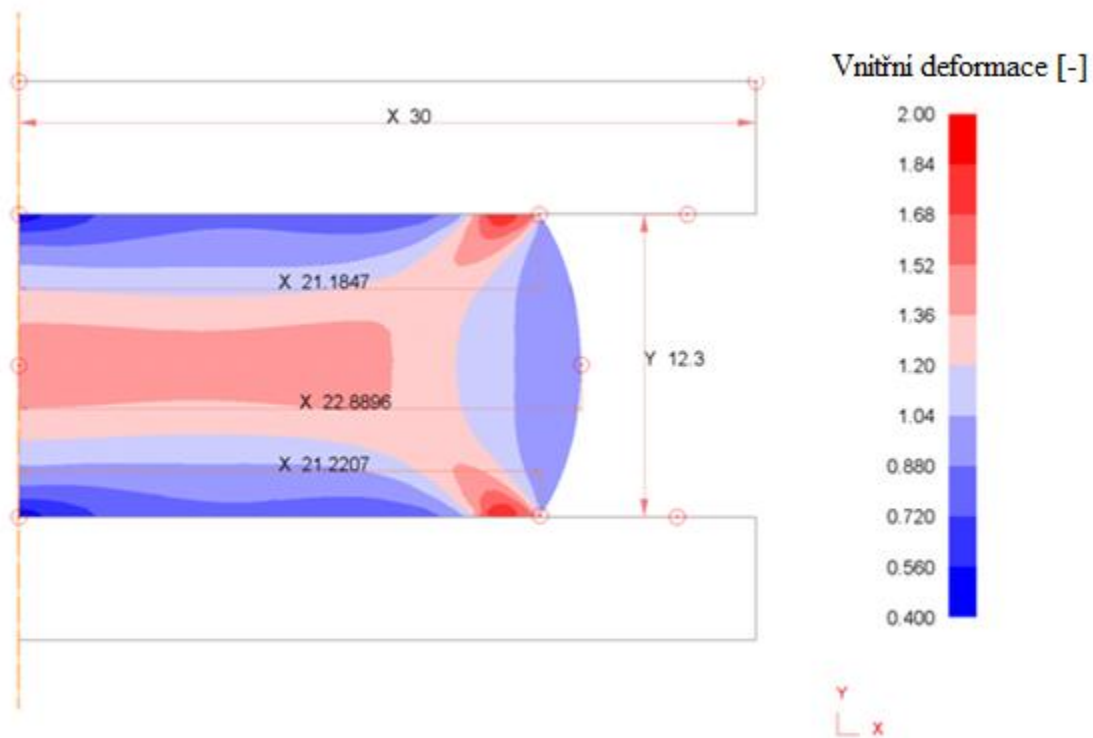
$$h_0 = e^{1,45}$$

$$h_0 \approx 4$$

Po dosazení do vzorce pro výpočet deformace:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_u}{h_0} \cdot 100 = \frac{4 - 1}{4} \cdot 100 = 3 \cdot 100 = 300 \%$$

Bezrozměrná hodnota vnitřní deformace 1,45 tedy po přepočtu odpovídá 300 % maximální vnitřní deformace v této oblasti vzorku.



**Obr. 28** - Rozměry vzorku a rozložení vnitřní deformace vzorku 2. série se stupněm deformace 68 %.

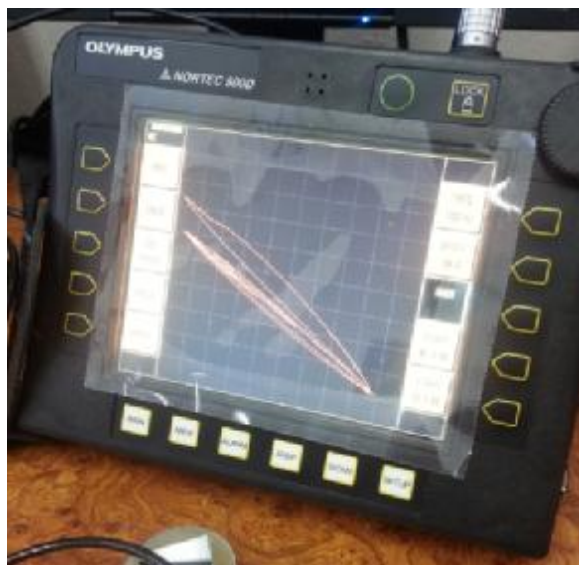
V tab. 3 jsou uvedeny hodnoty maximální vnitřní deformace pouze vzorků 2. série. Simulace pro deformované vzorky 1. série nemá s ohledem na teorii tváření smysl.

Stupeň deformace [%]	Maximální vnitřní deformace [-]	Přepočtená maximální vnitřní deformace [%]
nedeformovaný	0	0
5	0,068	7
6,5	0,077	8
10	0,13	14
20,5	0,33	39
28,5	0,44	55
42	0,78	118
55,5	1,2	232
68	1,45	300

Tab. 3 - Hodnoty maximální vnitřní deformace a přepočtené maximální vnitřní deformace vzorků 2. série.

#### 7.1.4 Zjišťování deformace vířivými proudy

Cílem zkoušení vzorků vířivými proudy je posoudit vliv velikosti deformace na elektromagnetické vlastnosti materiálu. Měření bylo prováděno na přístroji Olympus Nortec 500D. Pro jednotlivá měření byly používány různé typy měřicích sond.



Obr. 29 - Olympus Nortec 500D.



Obr. 30 - Absolutní sonda Olympus SL/300Hz-10kHz/0,62.

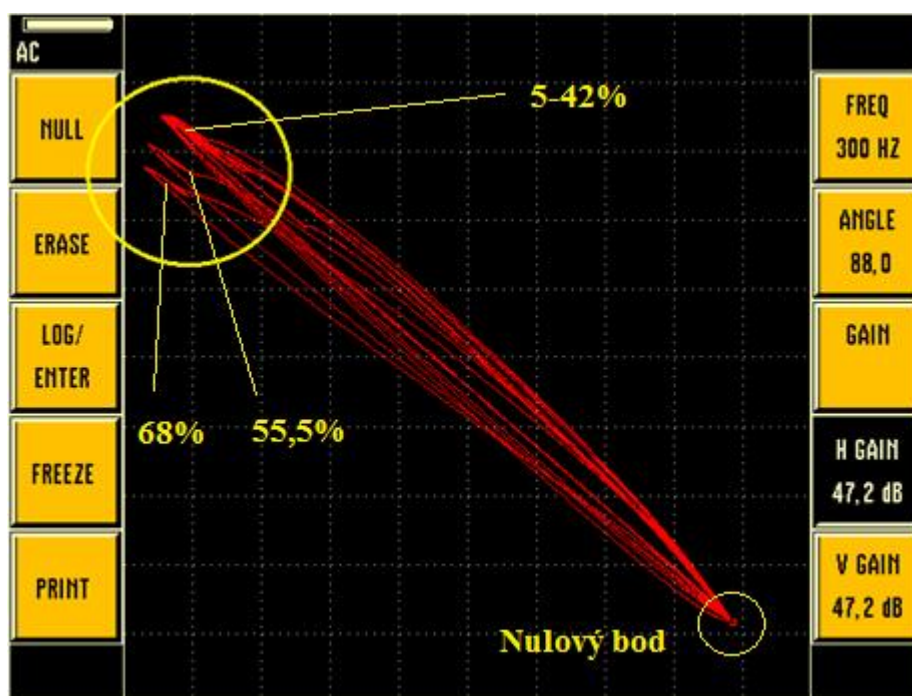
#### Ověřování deformace absolutními sondami

Vzorky obou sérií byly měřeny absolutní sondou Olympus SL/300Hz-10kHz/0,62. Měření probíhalo při zvolené frekvenci 300 Hz a hodnotě horizontálního a vertikálního buzení 47,2 dB.

Na obr. 31 je znázorněno rozhraní tzv. impedanční roviny. V pravém dolním rohu je tzv. nulový bod, který představuje počáteční hodnoty měřených vzorků. Poloha nulového bodu se volí softwarově jeho posunutím v impedanční rovině. S přibližováním sondy k povrchu vzorku se pracovní bod posouvá po křivce směrem k levému hornímu rohu, kde po úplném přiložení sondy k povrchu materiálu představuje tzv. koncový bod.

Polohy těchto bodů představují odezvu materiálu na vířivé proudy a odpovídají jednotlivým stupňům deformace. Na obr. 31 je znázorněno porovnání poloh koncových bodů všech vzorků 1. série. Nejvíce patrný rozdíl je mezi dvěma polohami, které odpovídají vzorkům se stupni deformace 55,5 a 68 %. Kromě poloh koncových bodů jsou důležité i tvary křivek v průběhu měření.

Pro porovnání výsledků byly vzorky měřeny i frekvencemi 270 Hz, 300 Hz, 1 kHz a 3 kHz. Při frekvencích 270 Hz a 1 kHz byla zřetelnější poloha koncového bodu vždy pouze některého ze vzorků celé série (stejně jako při frekvenci 300 Hz viz obr. 31). Při zvolené frekvenci 3 kHz nebyly rozdíly v polohách koncových bodů příliš patrné (viz příloha). Při těchto měřeních bylo zjištěno, že hliníková slitina EN AW-1090 má obecně velmi dobrou odezvu na vířivé proudy.



Obr. 31- Porovnání poloh koncových bodů všech vzorků 1. série při frekvenci 300 Hz.

### Měření elektrické vodivosti vířivými proudy

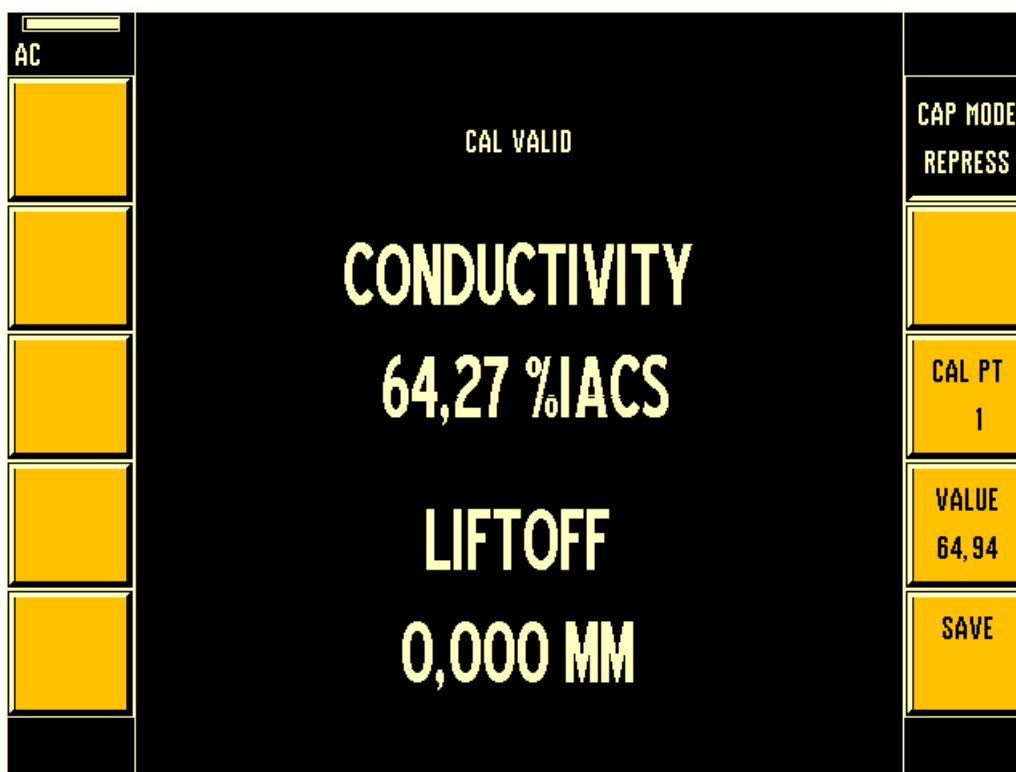
Cílem tohoto měření bylo zjistit, jak se mění hodnoty elektrické vodivosti materiálu v závislosti na jednotlivých stupních deformace a zda je tato metoda také vhodná pro ověřování stupně deformace. Rozdílem oproti předchozímu měření je, že měření elektrické vodivosti vířivými proudy poskytuje přesné číselné hodnoty, zatímco ověřování

deformace absolutními sondami poskytuje pouze tvar křivek a polohu koncových bodů. Elektrická vodivost obou sérií vzorků byla měřena absolutní sondou Olympus SPO-887L 60kHz.

Hodnota elektrické vodivosti je udávána v %IACS.<sup>14</sup> Hodnota 100 %IACS odpovídá elektrické vodivosti  $5,8 \cdot 10^7$  Siemensu. Takovou elektrickou vodivost má čistá elektrolytická měď a proto byla společně s materiálem 99,9 % Al, který má elektrickou vodivost 64,94 %IACS, použita jako etalon při kalibraci měřicí sondy. Pro rozsah hodnot elektrické vodivosti 62 - 110 %IACS je výrobcem udávána chyba měření  $\pm 1,0$  %IACS.

Samotné měření pak probíhalo těsným přiložením sondy k povrchu vzorku. Měřicí přístroj Olympus Nortec 500D následně interpretoval na displej hodnotu elektrické vodivosti vzorku v %IACS.

Na obr. 32 je znázorněno rozhraní měřicího módu, kde "*conductivity*" představuje hodnotu elektrické vodivosti a "*liftoff*" šířku povlaku na povrchu materiálu. Pokud byla při měření hodnota "*liftoff*" 0 mm, znamenalo to správnost měření. Na obr. 32 je znázorněna hodnota elektrické vodivosti nedeformovaného vzorku 1. série. Ta by měla být dle normy 64,94 %IACS. Tento rozdíl potvrzuje vysokou citlivost kalibrace sondy.



Obr. 32 - Procentuální hodnota elektrické vodivosti nedeformovaného vzorku 1. série.

<sup>14</sup> IACS = International Annealed Copper Standard

V tab. 4 jsou naměřené hodnoty elektrické vodivosti pro jednotlivé stupně deformace vzorků 1. a 2. série. Na rozdíl od předchozí metody tato metoda nebyla pro potřeby posuzování míry deformace použitelná a to patrně z důvodu použití továrně nastavené frekvence 60 kHz, kterou nelze u této měřicí sondy měnit. Nepoužitelnost metody dokazují hodnoty naměřené vířivými proudy při zvolené frekvenci 300 Hz, které se v závislosti na jednotlivých stupních deformace liší minimálně.

Stupeň deformace [%]	Elektrická vodivost [%IACS]
<b>1. série</b>	
nedeformovaný	64,27
5	62,74
6,5	62,95
10	63,16
20,5	62,95
28,5	62,58
42	62,58
55,5	62,74
68	62,45
<b>2. série</b>	
nedeformovaný	63,46
5	63,01
6,5	63,11
10	63,55
20,5	63,1
28,5	63,19
42	63,01
55,5	63,38
68	63,01

Tab. 4 - Naměřené hodnoty elektrické vodivosti pro jednotlivé stupně deformace vzorků 1. a 2. série.

### 7.1.5 Metalografické vyhodnocení

Součástí všech měření hliníkové slitiny bylo i metalografické vyhodnocení. Jeho cílem bylo určit, jak se v závislosti na stupni deformace mění tvar hranice zrn a velikost zrna.

Příprava vzorků byla až do operace broušení bezproblémová. Následovala operace leštění, která probíhala nejprve ručně. Po kontrole na metalografickém mikroskopu však bylo zjištěno, že na vyleštěném povrchu zůstávají nežádoucí částice kovů z brusných papírů, které by bránily analýze při zjišťování velikosti zrna.

Proto byly vzorky leštěny a následně leptány elektrolyticky. Ani tímto způsobem leštění se ale nepodařilo vzorky připravit do požadovaného stavu. Proto byla analýza pro zjištění změny tvaru zrna a jeho velikosti vynechána.

### 7.1.6 Porovnání naměřených výsledků

V tab. 5 je znázorněno porovnání všech naměřených hodnot jednotlivými metodami měření. Příslušné analýzy byly provedeny u vzorků 2. série.

Stupeň deformace [%]	Vnitřní deformace [-]	Přepočtená vnitřní deformace [%]	Tvrдость [HV]	Elektrická vodivost [%IACS]
nedeformovaný	0	0	25,6	63,46
5	0,068	7	28,6	63,01
6,5	0,077	8	32,3	63,11
10	0,13	14	34,6	63,55
20,5	0,33	39	36	63,1
28,5	0,44	55	39	63,19
42	0,78	118	44,3	63,01
55,5	1,2	232	41,3	63,38
68	1,45	300	46	63,01

Tab. 5 - Porovnání naměřených hodnot vzorků 2. série.

## 7.2 Konstrukční ocel S235JR-C

Pro účely měření bylo použito celkem 5 vzorků, 4 deformované (26,8; 43,7; 53,1; 63,1 %) a 1 nedeformovaný.

### 7.2.1 Příprava vzorků

Příprava vzorků oceli S235JR-C probíhala stejným způsobem jako u hliníkové slitiny. Po broušení následovalo navíc leštění a leptání povrchu vzorků. Vzorky, na kterých se prováděly následující analýzy, byly připraveny pouze příčným výbrusem.

#### Leštění vzorků

Pro dosažení hladkého, lesklého povrchu vzorku bylo potřeba po broušení zařadit operaci metalografického leštění. Tou bylo docíleno ideálního povrchu vzorku pro následné leptání.

#### Leptání vzorků

Aby bylo možné detekovat změnu velikosti zrna ve struktuře materiálu vlivem deformace, bylo potřeba povrchy vzorků pro následné metalografické hodnocení naleptat. Jako leptadlo byl použit 3 % roztok Nitalu.



### 7.2.2 Metalografické vyhodnocení

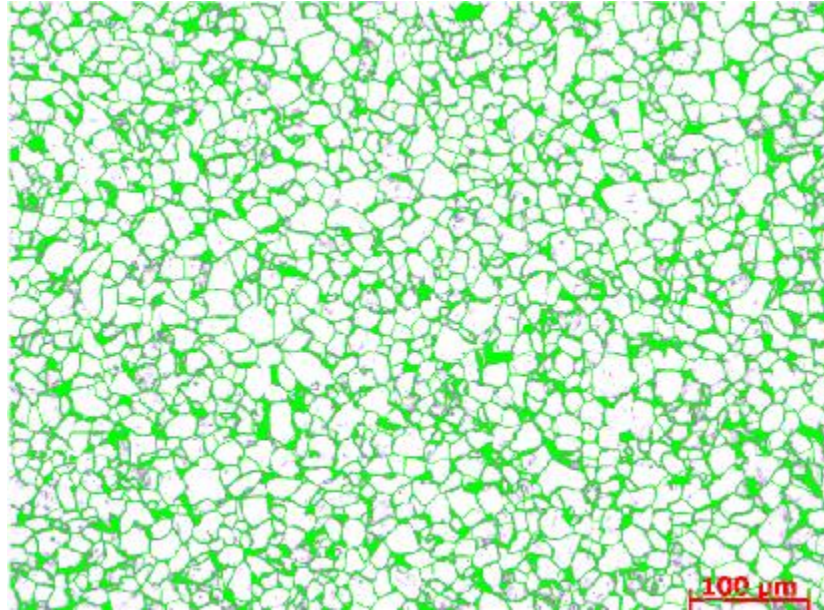
Cílem metalografického vyhodnocení bylo určit, jak se v závislosti na stupni deformace mění tvar hranice zrn a velikost zrna. Ta byla měřena na světelném optickém mikroskopu Carl Zeiss Observer ZIM v automatickém režimu softwaru AxioVision. Velikost zrna byla vyhodnocována dle ČSN ISO 643.



**Obr. 33** - Světelný optický mikroskop Carl Zeiss Observer ZIM.

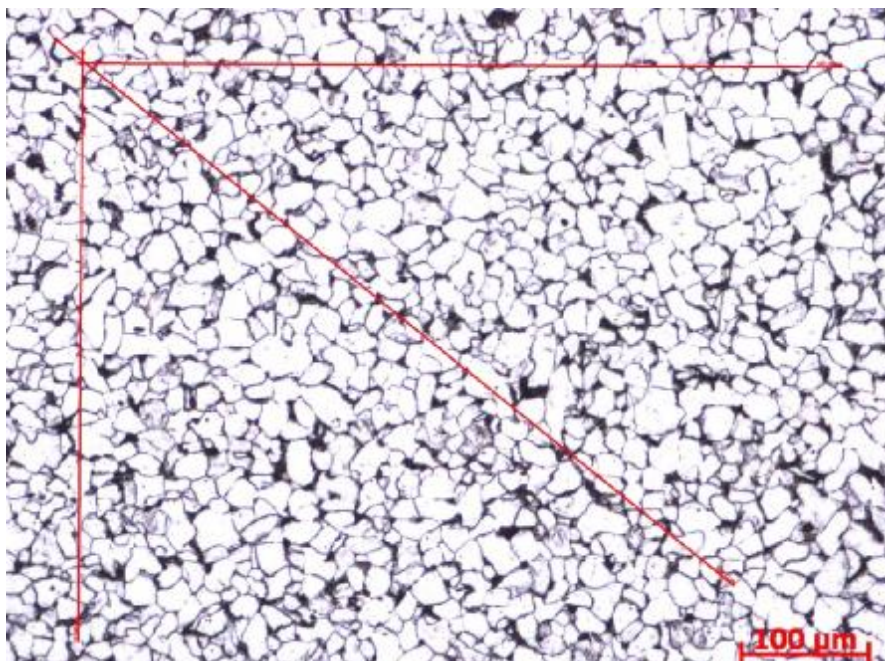
Metoda určování velikosti zrna spočívá v porovnávání barevného spektra jednotlivých pixelů. Pokud se dle nastavené přesnosti výrazně neliší, jsou pixely podobného spektra přiřazeny k sobě. Při vyhodnocování velikosti zrna byly v materiálu nejdříve vybrány složky, které nejsou důležité. V druhém kroku byla vybrána hranice zrna s možností následného ručního upravování. Vlastní výpočet velikosti zrna probíhal softwarově automaticky.

Na obr. 34 je znázorněn snímek z analýzy zjišťování velikosti zrna vzorku se stupněm deformace 63,1 % při zvětšení 100x. Snímek struktury byl pořízen ze středové oblasti vzorku.



**Obr. 34** - Snímek z analýzy zjišťování velikosti zrna vzorku se stupněm deformace 63,1 % při zvětšení 100x.

Při měření velikosti zrna u nedeformovaného vzorku a vzorku se stupněm deformace 26,8 % nebylo možné určit tyto hodnoty softwarově z důvodu špatné viditelnosti hranic zrn. Proto byly doměřeny v programu AxioVision "ručně".



**Obr. 35** - Snímek z ruční analýzy zjišťování velikosti zrna vzorku se stupněm deformace 63,1 % při zvětšení 100x.



V tab. 6 jsou uvedeny hodnoty velikosti zrn jednotlivých vzorků.

Stupeň deformace [%]	Velikost zrna [-]
nedeformovaný	9,01
26,8	9,12
43,7	9,23
53,1	9,31
63,1	9,54

Tab. 6 - Hodnoty velikosti zrn vzorků z oceli S235JR-C.

### 7.2.3 Měření tvrdosti dle Vickerse

Měření tvrdosti HV0,1 bylo provedeno stejným způsobem jako u hliníkové slitiny. Naměřené hodnoty tvrdosti včetně směrodatné odchylky jsou v tab. 7.

Stupeň deformace [%]	1. hodnota [HV]	2. hodnota [HV]	3. hodnota [HV]	Průměrná hodnota [HV]	Směrodatná odchylka
nedeformovaný	211	198	194	201	7,26
26,8	216	228	240	228	9,8
43,7	249	242	257	249	6,13
53,1	230	263	265	252	16,05
63,1	233	245	253	243	8,22

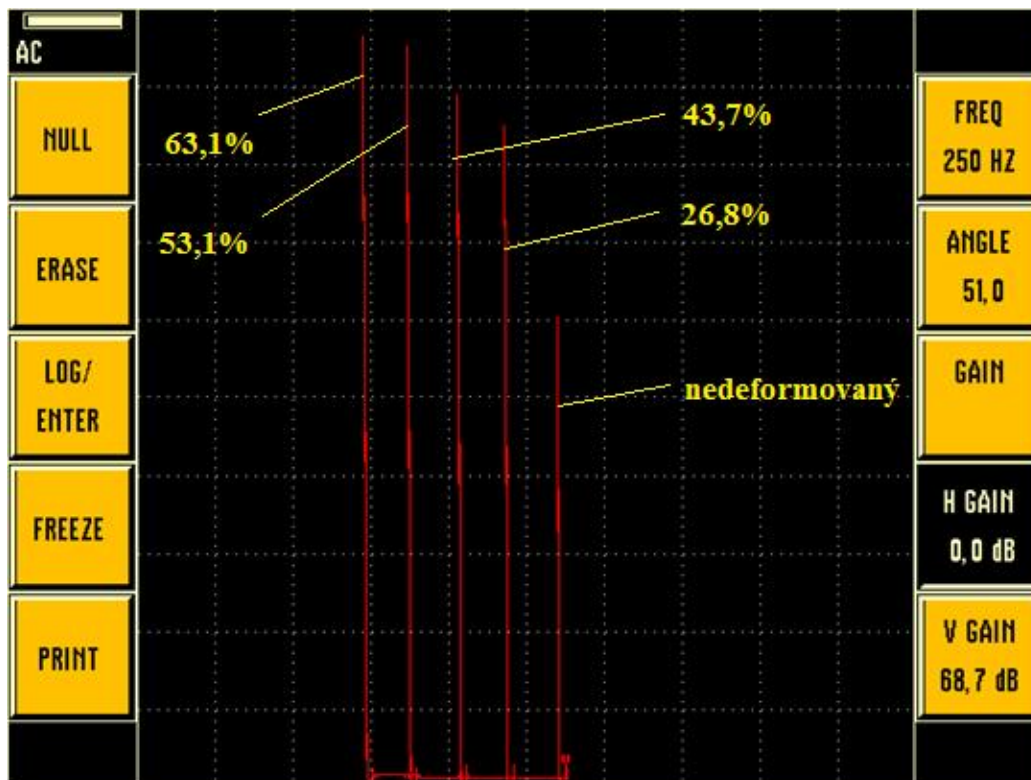
Tab. 7 - Naměřené hodnoty tvrdosti HV0,1 pro vzorky z oceli S235JR-C.

### 7.2.4 Zjišťování deformace vířivými proudy

Stejně jako u hliníkové slitiny byla zjišťována u oceli S235JR-C poloha koncových bodů v impedanční rovině a elektrická vodivost.

#### Ověřování deformace absolutními sondami

Všechny vzorky byly měřeny absolutní sondou Olympus SPO-887L 480kHz. V tomto případě byl nulový bod zvolen s nulovým horizontálním buzením. To proto, že při stejném nastavení jako v případě hliníkové slitiny metoda nevykazovala prokazatelné výsledky. Díky tomuto nastavení a zvolené frekvenci 250 Hz lze na obr. 36 pozorovat znatelné rozdíly v polohách koncových bodů všech vzorků. Hodnoty stupně deformace odpovídající těmto polohám jsou znázorněny na obr. 36. Samostatná měření vzorků s jednotlivými stupni deformace byla prováděna při frekvenci 1 kHz (viz příloha).



Obr. 36 - Porovnání poloh koncových bodů všech vzorků z oceli S235JR-C.

Při měření bylo zjištěno, že ocel S235JR-C má v porovnání s hliníkovou slitinou špatnou odezvu na vířivé proudy.

### Měření elektrické vodivosti vířivými proudy

Elektrická vodivost všech vzorků byla měřena speciální sondou na měření elektrické vodivosti Olympus SPO-887L 60kHz. Kalibrace byla provedena pomocí dvou etalonových kalibračních materiálů, titanové slitiny  $Ti_6Al_4V$  a ocelí 11321. Pro rozsah hodnot elektrické vodivosti 0,9 - 62 % IACS je výrobcem udávána chyba měření  $\pm 0,5$  % IACS.

Z naměřených hodnot v tab. 8 lze vypočítat určitý trend ve snižování a zvyšování hodnot elektrické vodivosti (hodnoty se liší minimálně). Vzhledem k teoretickým předpokladům by mělo docházet pouze ke zvyšování hodnot a proto je tato metoda měření elektrické vodivosti vířivými proudy nepoužitelná.

Stupeň deformace [%]	Elektrická vodivost [%IACS]
nedeformovaný	11,8
26,8	9,46
43,7	8,75
53,1	9,18
63,1	8,73

Tab. 8 - Naměřené hodnoty elektrické vodivosti vzorků z oceli S235JR-C.

### 7.2.5 Porovnání naměřených výsledků

V tab. 9 je znázorněno porovnání všech naměřených hodnot jednotlivými metodami měření. Minimální rozdíly v hodnotách tvrdosti a hodnotách velikosti zrna jsou zapříčiněny tím, že byly měřeny vzorky připravené příčným výbrusem. Projevy deformace na tyto veličiny proto nejsou tak výrazné jako v případě, že by byly měřeny vzorky připravené podélným výbrusem.

Stupeň deformace [%]	Velikost zrna [-]	Tvrdost [HV]	Elektrická vodivost [%IACS]
nedeformovaný	9,49	201	11,8
26,8	9,53	228	9,46
43,7	9,23	249	8,75
53,1	9,31	252	9,18
63,1	9,54	243	8,73

Tab. 9 - Porovnání naměřených hodnot vzorků z oceli S235JR-C.

## 8 Diskuze výsledků

Metodou vířivých proudů byla ověřována možnost zjišťování deformačních stavů dvou materiálů - hliníkové slitiny EN AW-1090 a oceli S235JR-C.

Pro potřeby měření byly metodou stlačování připraveny vzorky s různým stupněm deformace. První sérii vzorků hliníkové slitiny tvořily vzorky připravené příčným výbrusem a druhou sérii vzorky připravené podélným výbrusem. Vzorky oceli S235JR-C byly připraveny pouze příčným výbrusem.

Z důvodu dokumentace vnitřního stavu materiálu bylo provedeno u hliníkové slitiny měření mikrotvrdosti, simulace deformace a metalografické vyhodnocení. U oceli S235JR-C bylo provedeno měření mikrotvrdosti a metalografické vyhodnocení.

U hliníkové slitiny bylo měřením mikrotvrdosti zjištěno, že vlivem deformace dochází ke zpevnění materiálu, což je v souladu s teoretickými předpoklady. U hliníkové slitiny bylo na základě provedené simulace deformace zjištěno, že se zvyšujícím se stupněm deformace se zvyšuje hodnota maximální vnitřní deformace ve středové oblasti vzorků. U hliníkové slitiny nebylo možné určit metalografickým vyhodnocením deformovanou strukturu, neboť metalografické atributy neumožňovaly tuto slitinu naleptat. Tuto příčinu se nepodařilo objasnit.

Druhým typem materiálu byla konstrukční ocel S235JR-C, u které bylo provedeno měření mikrotvrdosti a metalografické vyhodnocení. I u tohoto materiálu došlo se zvyšujícím se stupněm deformace ke zpevnění. Metalografickým vyhodnocením bylo zjištěno, že tvar hranice zrna se mění se zvyšujícím se stupněm deformace a hodnota velikosti zrna se zvyšuje.

Pro potřeby ověřování deformace pomocí vířivých proudů bylo použito dvou měřicích metod. První metodou byla zjišťována odezva materiálu na vířivé proudy pomocí pohybu pracovního bodu v impedanční rovině. Při tomto způsobu bylo použito absolutních sond Olympus SPO-887L 480kHz pro ocel S235JR-C a Olympus SL/300Hz-10kHz/0,62 pro hliníkovou slitinu. Při tomto měření byly sondy buzené nízkofrekvenčním napětím o frekvenci 300 Hz. Použití vyšších frekvencí při tomto způsobu měření mělo za důsledek snížení citlivosti této metody a nebylo možné detekovat změnu polohy pracovního bodu. Touto metodou bylo možné rozlišit deformační stavy jednotlivých vzorků, tj. bylo možné detekovat stupeň deformačního zpevnění.

Tento způsob ověřování stupně deformace se jeví jako v praxi uplatnitelný, neboť míra deformace materiálu výrazně ovlivňuje trajektorii pracovního bodu v impedanční rovině (tzn. lze graficky rozlišit různě deformované vzorky).

Druhé měření metodou vířivých proudů spočívalo v přímém měření elektrické vodivosti. Při tomto měření byly použity sondy Olympus SPO-887L 60kHz pro ocel S235JR-C a absolutní sonda Olympus SPO-887L 60kHz pro hliníkovou slitinu. Ty umožňují přímý převod odezvy materiálu z vířivých proudů na elektrickou vodivost materiálu.

Bylo zjištěno, že tento způsob není pro ověřování deformačního zpevnění použitelný. Příčinou byly malé rozdíly mezi jednotlivými hodnotami elektrické vodivosti u všech vzorků.

## 9 Závěr

V této práci byl popsán vnitřní stav deformovaného materiálu a současně byla popsána korelace mezi velikostí vnitřní deformace a odezvou na vířivé proudy.

Experimentálním programem bylo zjištěno a ověřeno, že se zvyšujícím se stupněm vnější deformace se zvyšuje hodnota maximální vnitřní deformace, zvyšuje se tvrdost materiálu, dochází ke změně tvaru zrn a zvyšuje se hodnota velikosti zrn. Oproti teoretickým předpokladům nebylo možné ověřovat míru deformace pomocí přímého měření elektrické vodivosti. Dále bylo zjištěno, že pro měření deformačního zpevnění je výhodnější používat nízkofrekvenční buzení cívky.

Na základě provedených měření a zjištěných výsledků tak lze považovat NDT metodu vířivých proudů za vhodnou k ověřování stupně vnější deformace materiálu. Výsledky měření z této práce lze použít v praxi. Cíle práce byly naplněny.

## 10 Použitá literatura

- [1] ASM International;ASM Handbook; *Volume 17: Nondestructiveevaluation and qualitycontrol*; 1997; ISBN 0-87170-007-7
- [2] ASM International;ASM Handbook; *Volume 14: Forming and Forging*; 1988
- [3] John Wiley&Sons, Inc.; MechanicalEngineers' Handbook; Materials and Mechanical Design;Volume 1; ThirdEdition; Chapter 36; *Nondestructiveinspection*; Edited by MyerKutz; 2006
- [4] SKÁLOVÁ, J., BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, J.; *Základní zkoušky kovových materiálů*; Vydání 2; Fakulta strojní; Západočeská univerzita v Plzni; ISBN 80-7082-021-7; Plzeň 1995
- [5] SKÁLOVÁ, J., BENEDIKT, V., KOVAŘÍK, J.; *Základní zkoušky kovových materiálů*; Fakulta strojní; Západočeská univerzita v Plzni; Plzeň 2000
- [6] PÍŠEK, F., JENÍČEK, L., RYŠ, P.; *Nauka o materiálu I*; Vydání 1; *Nauka o kovech* ; Praha 1966
- [7] PLUHAŘ, J., KORITTA, J.; *Strojní materiály*; Vydání 2; SNLT, Nakladatelství technické literatury; Praha 1977
- [8] RYŠ, P., CENEK, M., MAZANEC, K., HRBEK, A.; *Nauka o materiálu I*, Vydání 4; *Železo a jeho slitiny*; Nakladatelství Československé Akademie věd; Praha 1975
- [9] JENÍČEK, L., RYŠ, P., CENEK, P., HRBEK, A.; *Nauka o materiálu I*, Vydání 2; *Vlastnosti kovů*; Nakladatelství Československé Akademie věd; Praha 1968
- [10] PLUHAŘ, J., BENEŠ, V., MACEK, K.; *Fyzikální metalurgie a mezní stavy materiálů*; Vydání - dotisk; Číslo publikace - 4594; Fakulta strojní; ČVUT Praha; Praha 1983
- [11] PTÁČEK, L. a kolektiv; *Nauka o materiálu I*; Akademické nakladatelství CERM s.r.o.; ISBN 80-7204-283-1 (2. opr. a rozš. vyd.); ISBN 80-7204-193-2 (1. vyd.); Brno 2003
- [12] BENEŠOVÁ, S.; *Materiálové modelování a numerická simulace jako nástroj pro vývoj technologických procesů*; Disertační práce; Západočeská Univerzita v Plzni; Fakulta strojní; Plzeň 2010
- [13] ZEDNÍČEK, J.; *Deformační a lomové chování materiálu*; Bakalářská práce; Agronomická fakulta; Ústav techniky a automobilové dopravy; Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně; Brno 2007
- [14] KUBEŠ, M.; *Diagnostika vodivých materiálů vířivými proudy*; Bakalářská práce; PDF; Fakulta elektrotechnická; Katedra měření; ČVUT Praha; Praha 2010

[15] BAŽANT, J.; *Defektoskopie vířivými proudy pomocí diferenčních reflexních snímačů*; Autoreferát disertační práce; PDF; Fakulta mechatroniky a mezioborových inženýrských studií; Technická univerzita v Liberci; Liberec 2008

[16] VÍTÁMVÁS, Z.; *Moderní diagnostické metody používané v defektoskopii*; Bakalářská práce; Fakulta strojního inženýrství; Vysoké učení technické v Brně; PDF; Brno 2009;

Dostupné z: [www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=15173](http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15173)

[17] ŠROUB, J.; *Metoda vířivých proudů*; Semestrální práce; Word; Západočeská Univerzita v Plzni; Fakulta strojní; Plzeň 2004

[18] Pedagogická fakulta Masarykovy univerzity; Masarykova univerzita Brno; PDF; Dostupné z: [www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/](http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/)

[19] NAVRÁTIL, V.; *Od pazourku k nanomateriálům*; [online]; [cit. 2014-10-12]; Masarykova univerzita Brno; Word, PDF; Dostupné z: [www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/](http://www.ped.muni.cz/wphy/fyzvla/)

[20] Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství; Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava; *Poruchy krystalické mřížky*; [online]; [cit. 2014-10-24] Prezentace Powerpoint; Dostupné z: [www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide2-Poruchy\\_krystalicke\\_mrizky.pdf](http://www.fs.vsb.cz/export/sites/fs/339/.content/files/Slide2-Poruchy_krystalicke_mrizky.pdf)

[21] KUČAVÍK, P.; *Nové trendy zjišťování korozního napadení objektů pro uskladnění a transport nebezpečných látek*; [online]; [cit. 2014-11-12]; Dostupné z: [www.ndttrade.cz/UserFiles/File/korozivni%20nap.pdf](http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/korozivni%20nap.pdf)

[22] ATG - Advanced Technology Group s.r.o.; [online]; [cit. 2014-10-23]; *Metoda vířivých proudů*; Praha; Dostupné z: [www.atg.cz/](http://www.atg.cz/)

[23] Wikipedie; Otevřená encyklopedie; [online]; [cit. 2014-11-24]; *Válcování kovů*; Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lcov%C3%A1n%C3%AD\\_kov%C5%AF](http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%A1lcov%C3%A1n%C3%AD_kov%C5%AF)

[24] Olympus; *Eddy Current Inspection*; [online]; [cit. 2014-11-20]; Eddy Current Probes and Accessories; Dostupné z: [www.olympus-ims.com](http://www.olympus-ims.com)

[25] Technická univerzita Liberec; Fakulta strojní; Katedra strojírenské technologie; Oddělení tváření kovů a plastů; [online]; [cit. 2014-11-24]; Dostupné z: [www.ksp.tul.cz](http://www.ksp.tul.cz)

[26] SOBOTKA, J.; Technická univerzita v Liberci; Fakulta strojní; Katedra strojírenské technologie; [online]; [cit. 2014-12-2]; *Materiály vhodné pro tváření, vliv chemického složení a struktury na deformační odpor a deformační schopnost kovů*; Dostupné z: [www.tul.cz](http://www.tul.cz)

[27] BOHÁČOVÁ, M.; Výzkumný a zkušební letecký ústav, a.s. Praha; [online]; [cit. 2014-10-18]; Rešerše NDT metod používaných v letectví; Dostupné z: [www.vzlu.cz](http://www.vzlu.cz)

[28] JANÍČKOVÁ, P.; [online]; [cit. 2014-11-11]; *Nedestruktivní zkoušky materiálu*; Dostupné z: [www.uvp3d.cz/drtic/?page\\_id=2056](http://www.uvp3d.cz/drtic/?page_id=2056)



[29] SHAN, H., S.; [online]; [cit. 2015-6-9]; *Manufacturing processes*; Dostupné z: [www.nptel.ac.in/courses/112107144/main.htm](http://www.nptel.ac.in/courses/112107144/main.htm)

[30] Nedestruktivní defektoskopie v průmyslu; [online]; [cit. 2015-6-10]; Princip metody MT, Dostupné z: [www.ndt.cz](http://www.ndt.cz)

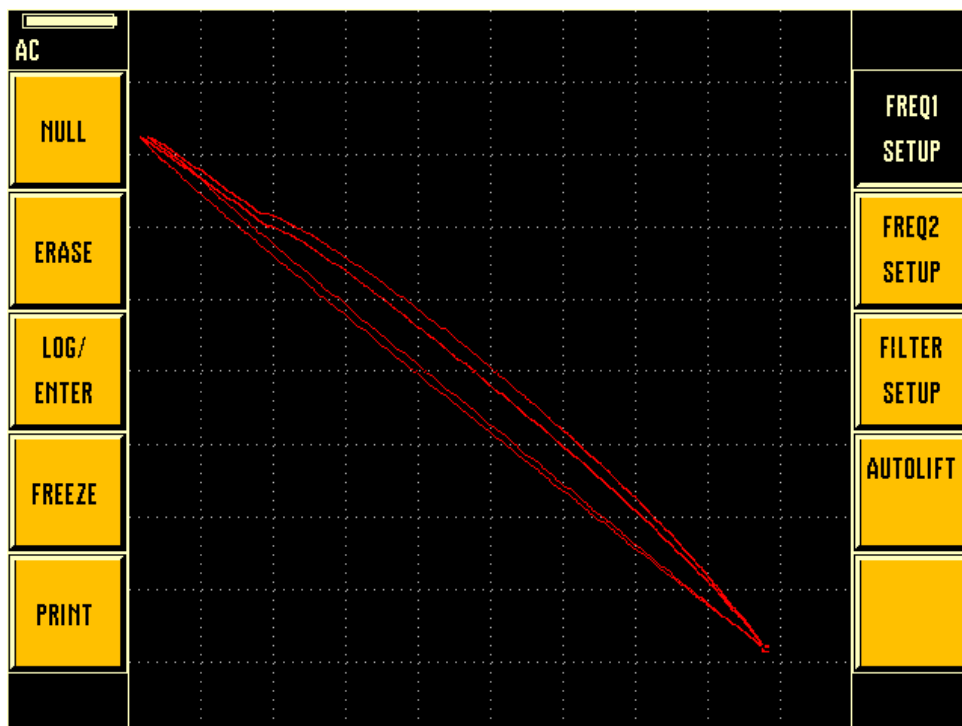
[31] Plastic Deformation of Metals and Related Properties; [online]; [cit. 2015-6-17]; PDF; Dostupné z: [www.newagepublishers.com](http://www.newagepublishers.com)



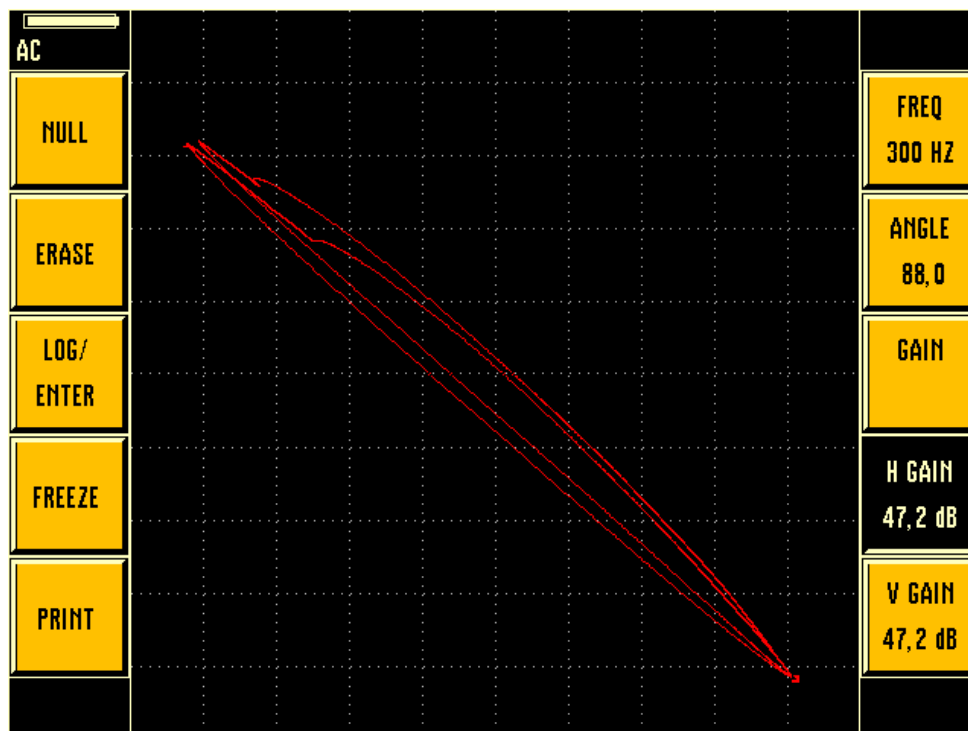
## **Seznam příloh**

## 11 Seznam příloh

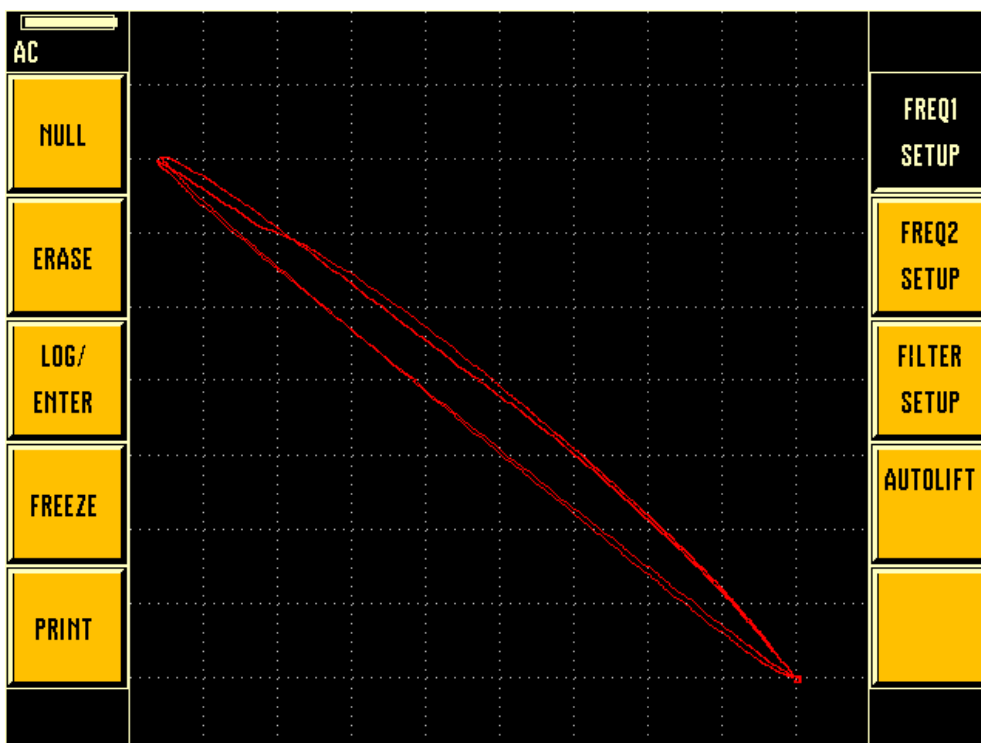
### PŘÍLOHA č. 1 - Zjišťování deformace vířivými proudy



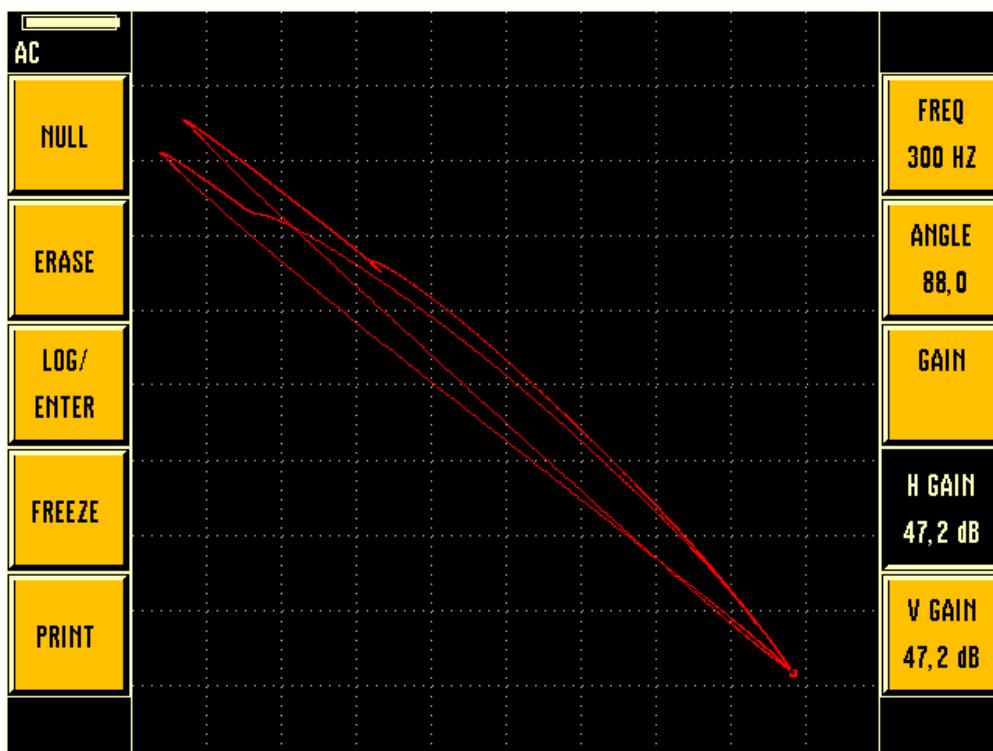
Obr. 37 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků 1. série z hliníkové slitiny se stupněm deformace 5 a 10 %.



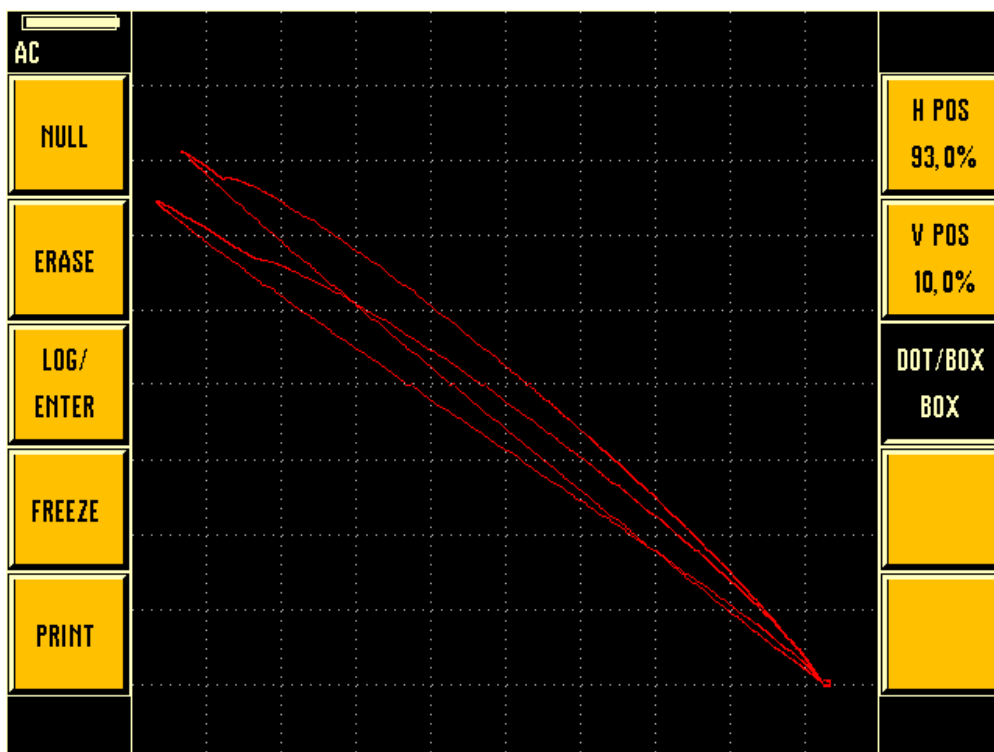
Obr. 38 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků 1. série z hliníkové slitiny se stupněm deformace 5 a 28,5 %.



Obr. 39 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků 1. série z hliníkové slitiny se stupněm deformace 5 a 42 %.



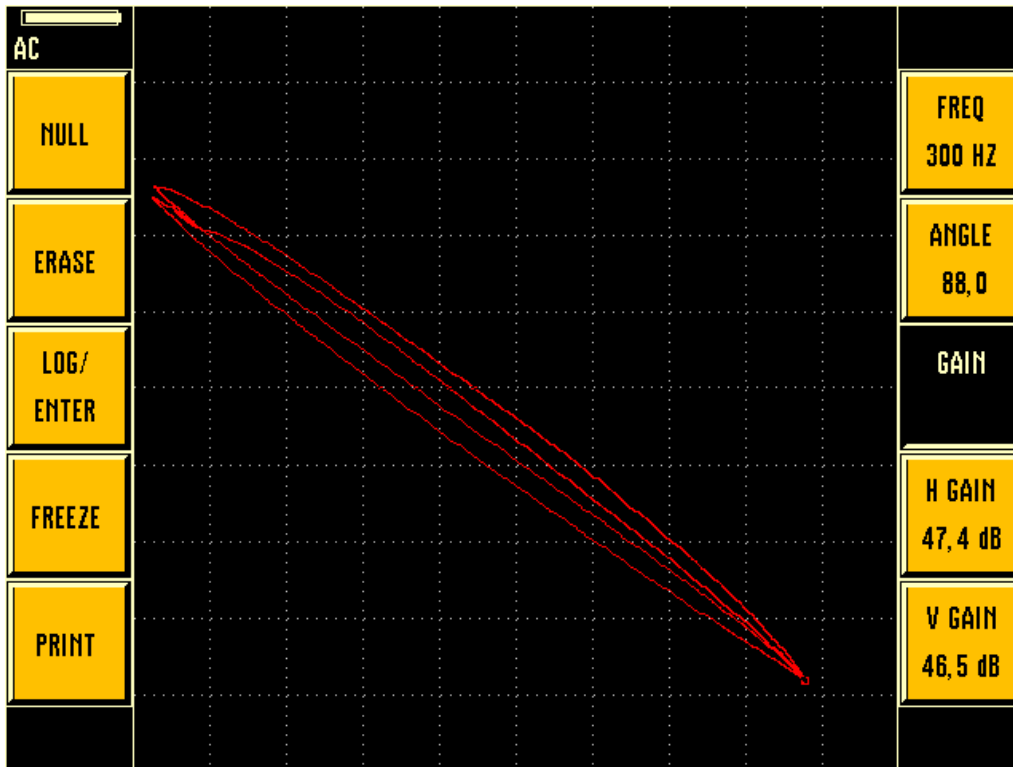
Obr. 40 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků 1. série z hliníkové slitiny se stupněm deformace 5 a 55,5 %.



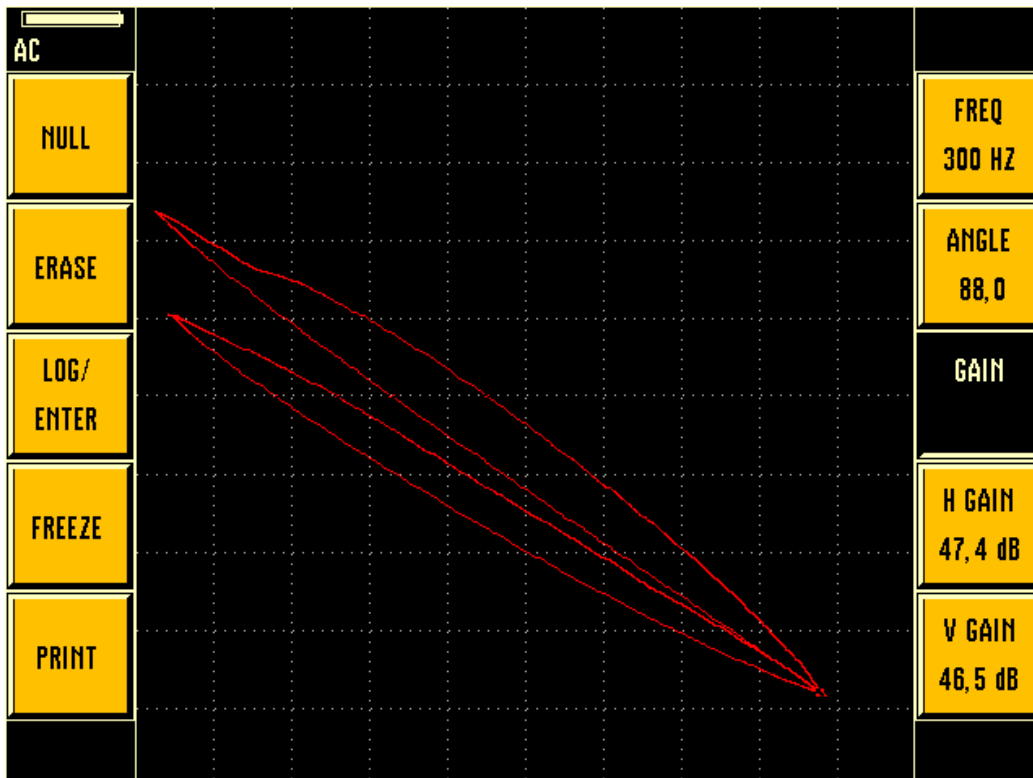
Obr. 41 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků 1. série z hliníkové slitiny se stupněm deformace 5 a 68 %.



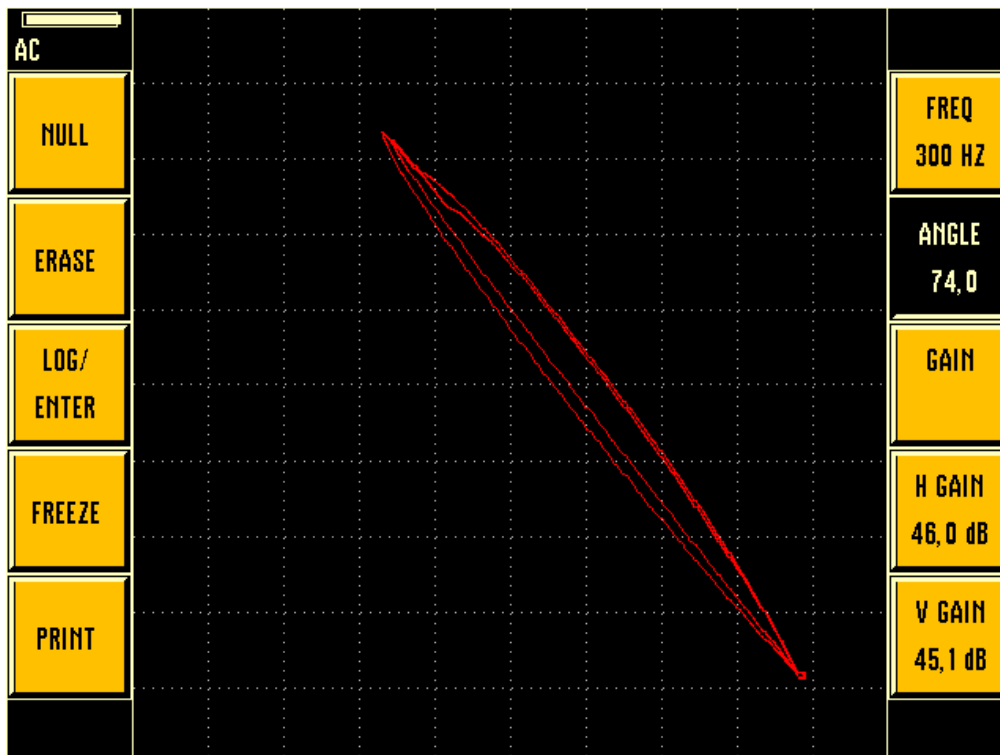
Obr. 42 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů nedeformovaného vzorku z hliníkové slitiny a vzorku se stupněm deformace 68 % 1. série.



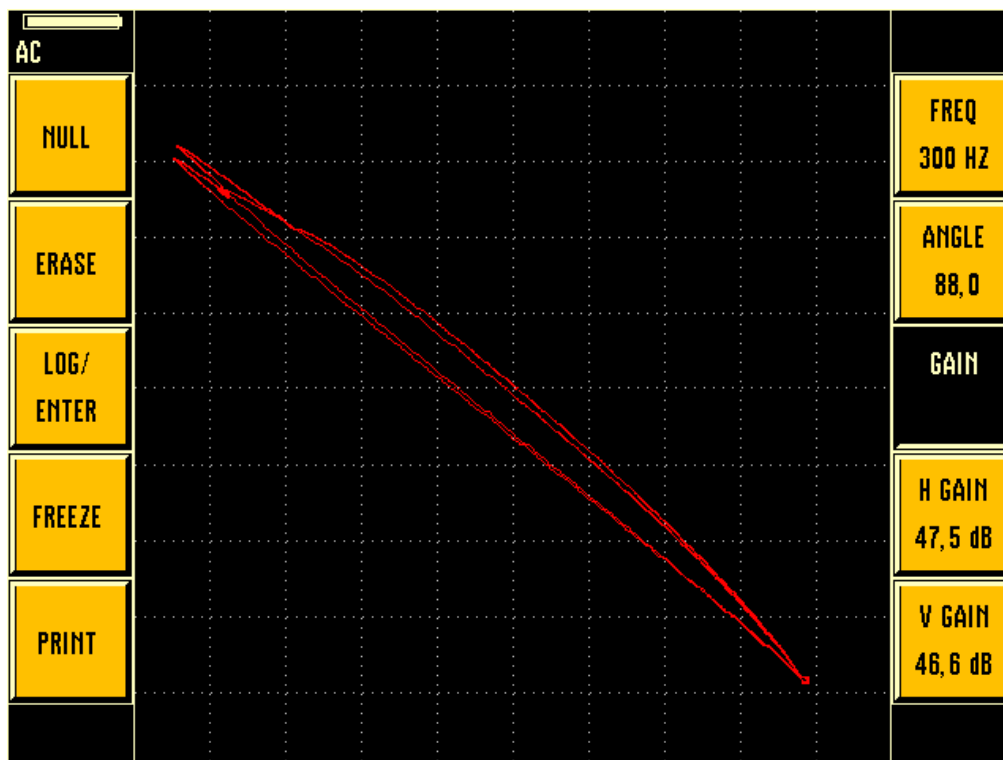
Obr. 43 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 1. a 2. série se stupněm deformace 55,5 % - koncový bod 2. série je níže.



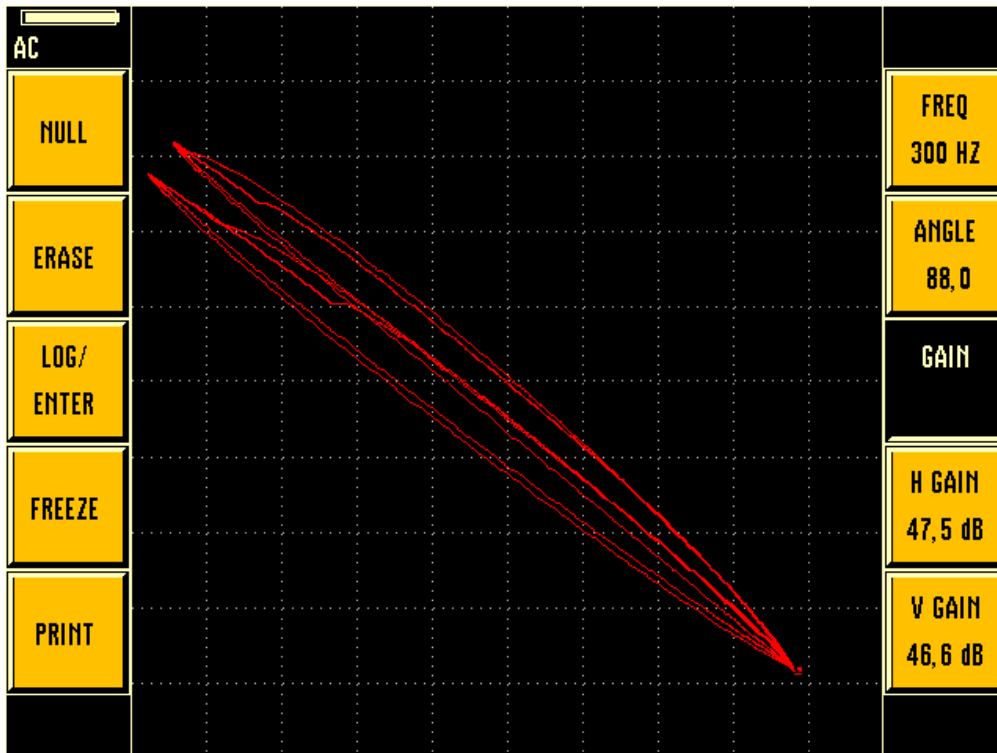
Obr. 44- Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 1. a 2. série se stupněm deformace 68 % - koncový bod 2. série je níže.



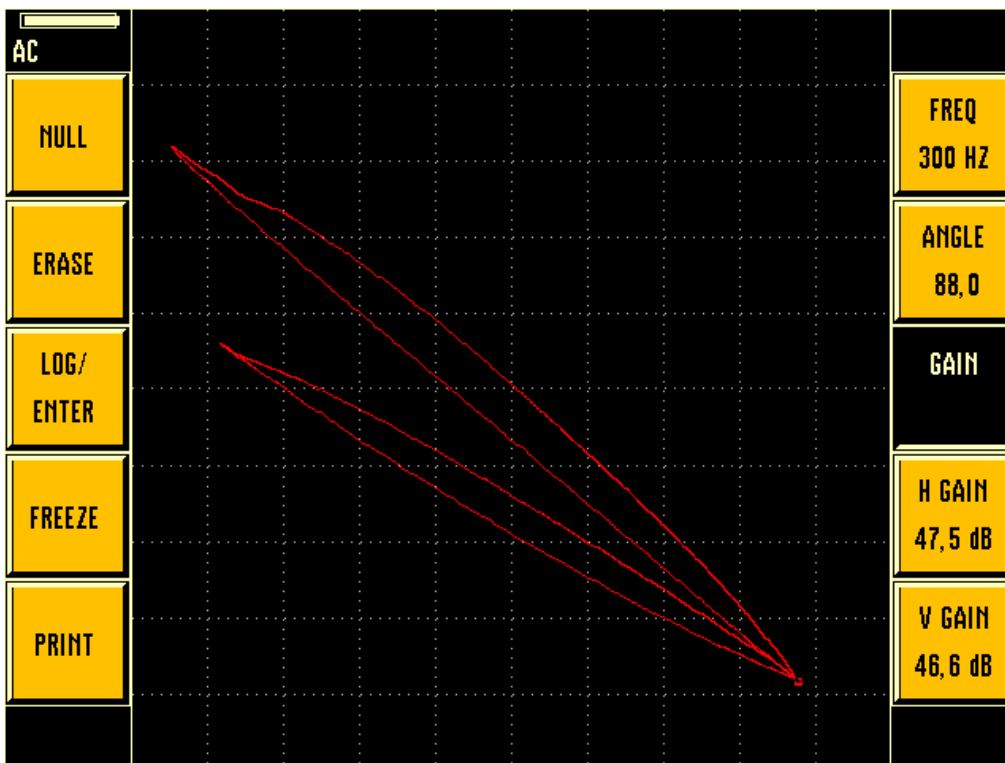
Obr. 45 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů nedeformovaných vzorků z hliníkové slitiny 1. a 2. série.



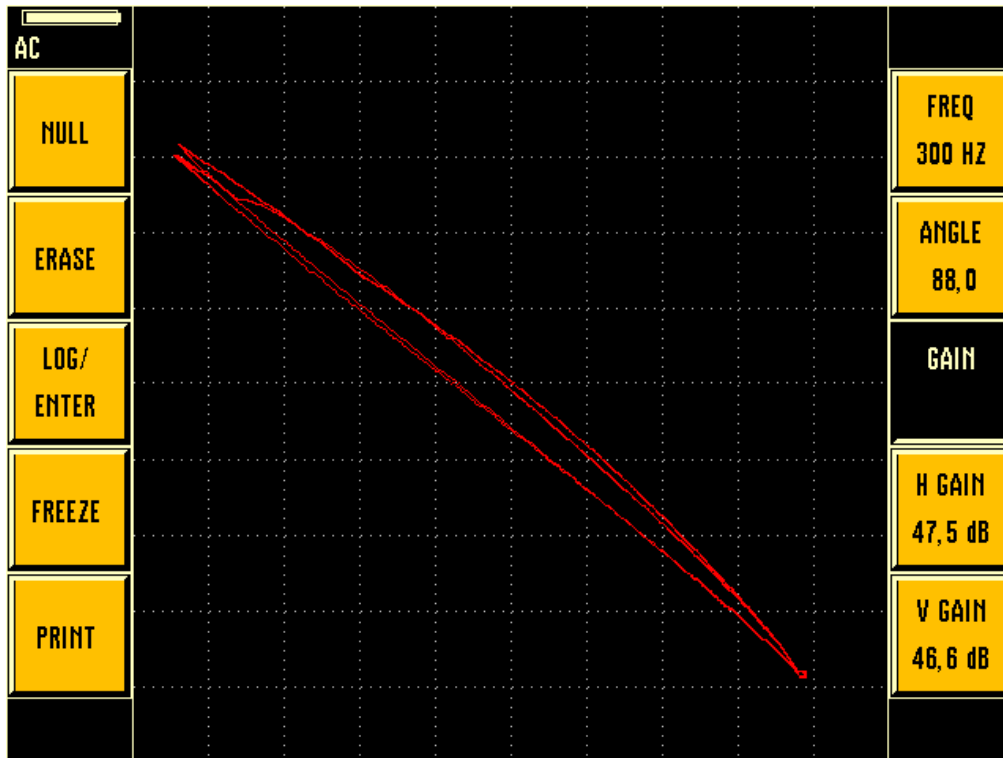
Obr. 46 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 2. série se stupněm deformace 5 a 42 %.



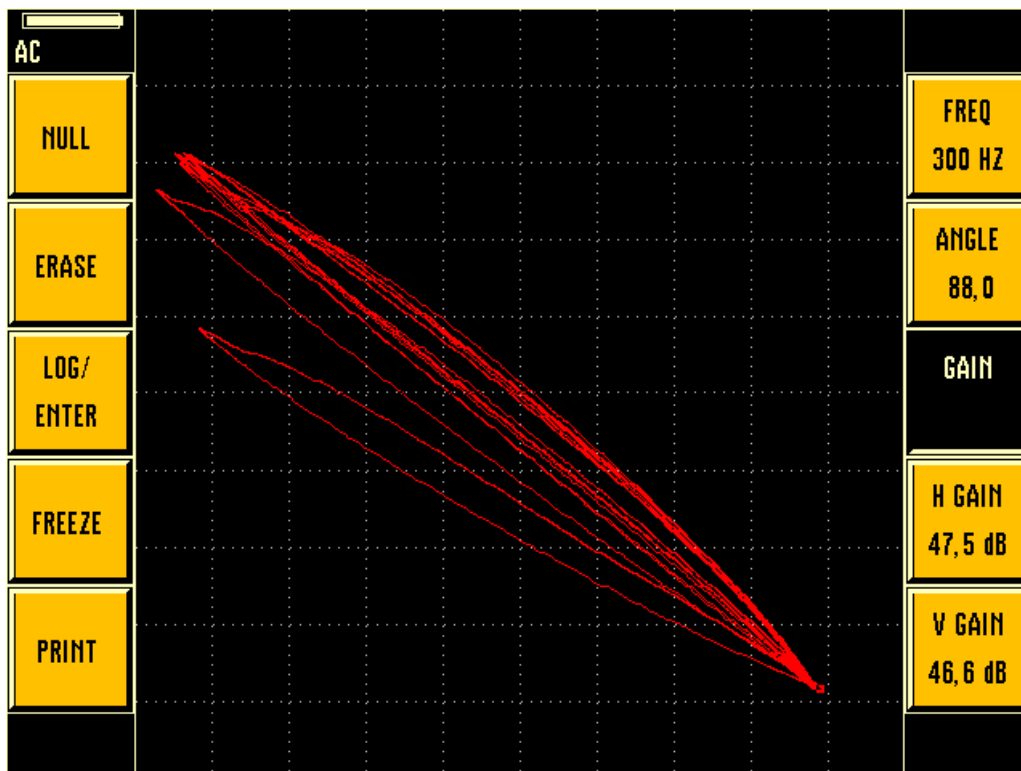
Obr. 47 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 2. série se stupněm deformace 5 a 55,5 %.



Obr. 48 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 2. série se stupněm deformace 5 a 68 %.



Obr. 49 - Porovnání vzájemné polohy koncových bodů vzorků z hliníkové slitiny 2. série se stupněm deformace 20,5 a 42 %.

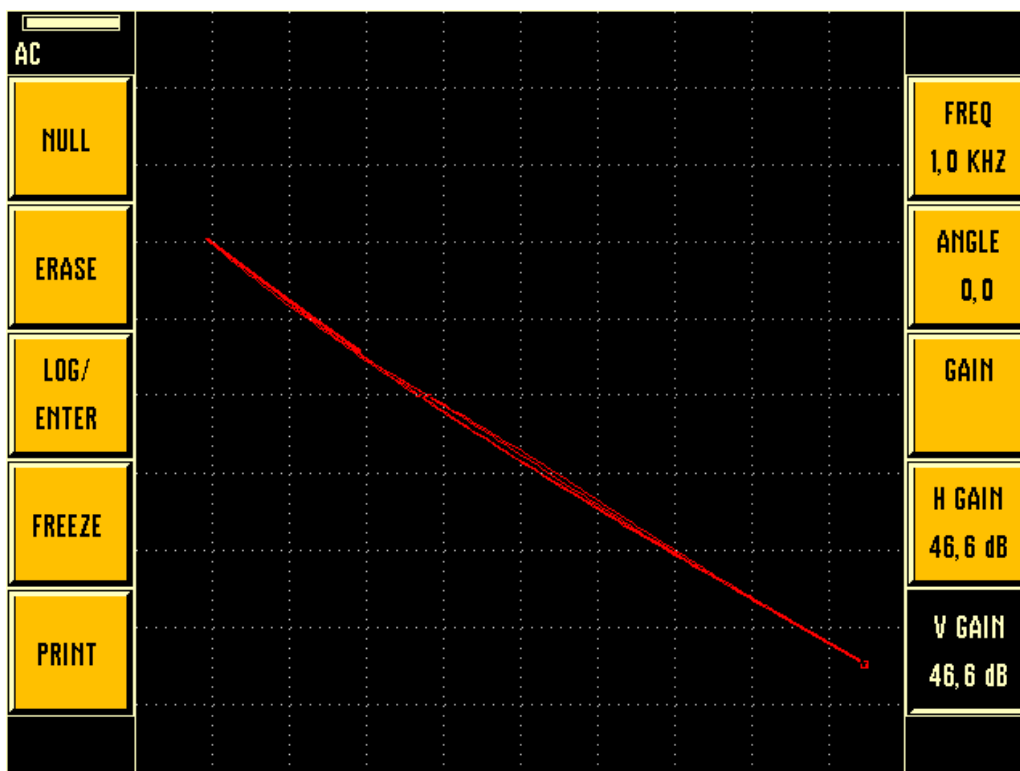


Obr. 50 - Porovnání poloh koncových bodů všech vzorků 2. série z hliníkové slitiny.

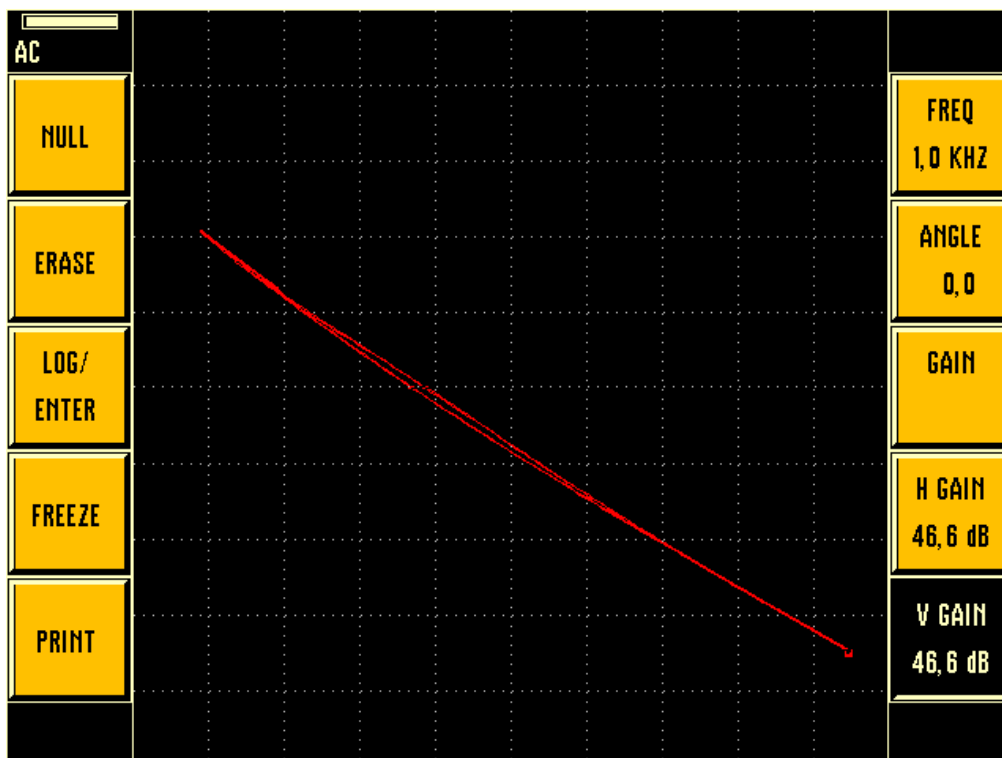




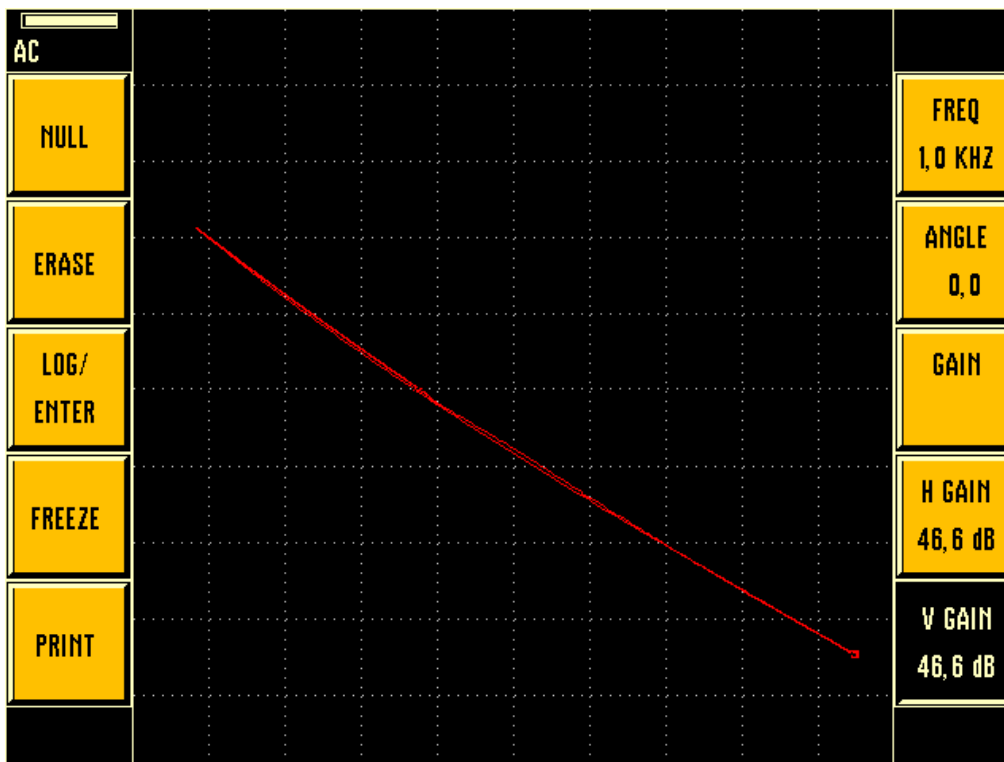
Obr. 51 - Poloha koncového bodu v impedanční rovině nedeformovaného vzorku z oceli S235JR-C.



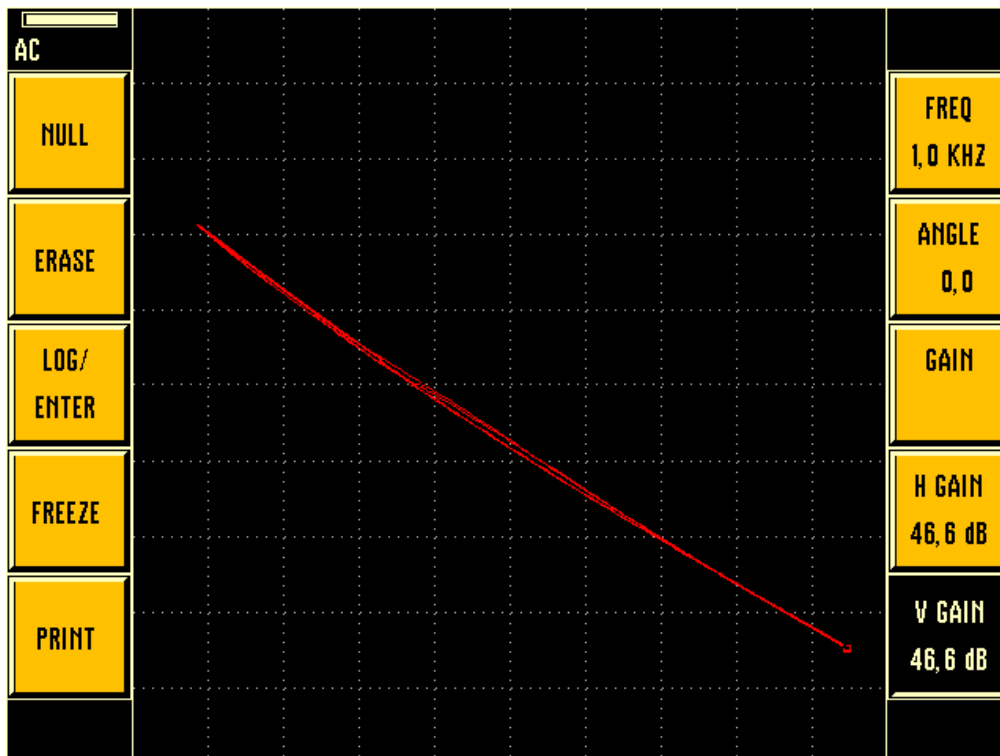
Obr. 52 - Poloha koncového bodu v impedanční rovině vzorku z oceli S235JR-C se stupněm deformace 26,8 %.



Obr. 53 - Poloha koncového bodu v impedanční rovině vzorku z oceli S235JR-C se stupněm deformace 43,7 %.

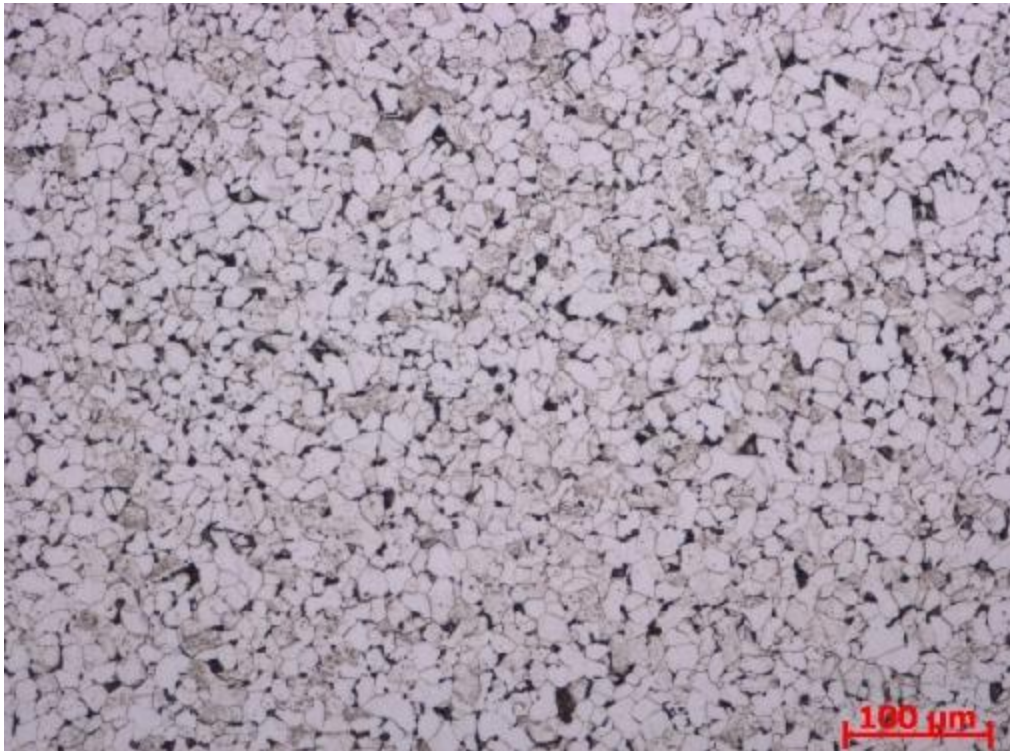


Obr. 54 - Poloha koncového bodu v impedanční rovině vzorku z oceli S235JR-C se stupněm deformace 53,1 %.

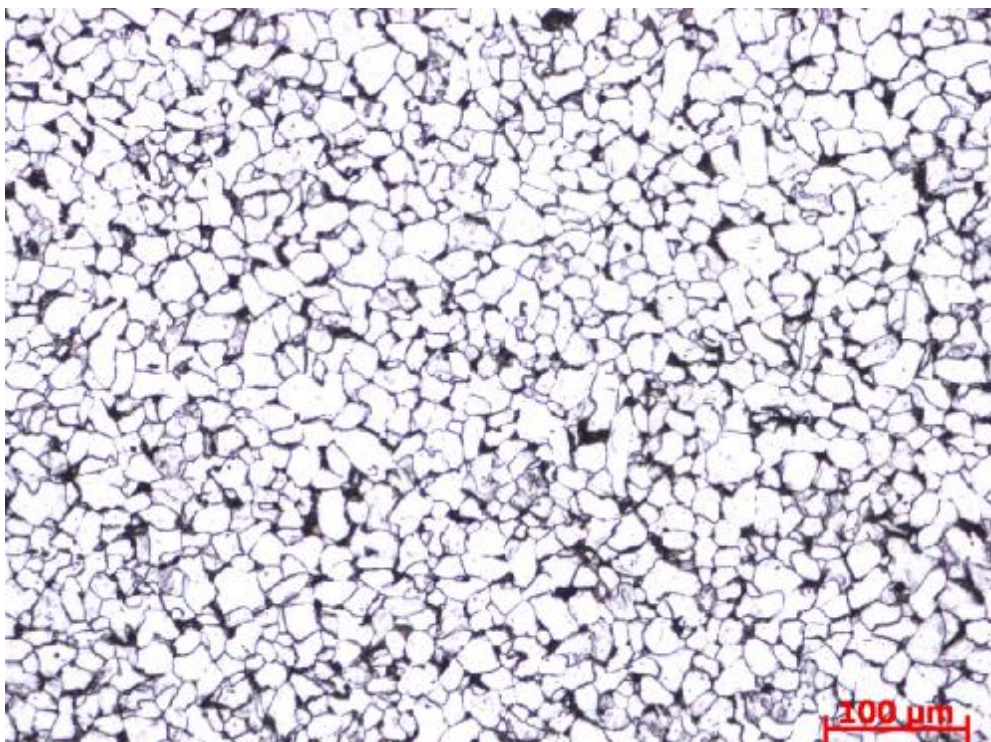


**Obr. 55** - Poloha koncového bodu v impedanční rovině vzorku z oceli S235JR-C se stupněm deformace 63,1 %.

## PŘÍLOHA č. 2 - Metalografické vyhodnocení



**Obr. 56** - Snímek naleptané struktury nedeformovaného vzorku z oceli S235JR-C při zvětšení 100x - poloha uprostřed.



**Obr. 57** - Snímek naleptané struktury vzorku se stupněm deformace 26,8 % z oceli S235JR-C při zvětšení 100x - poloha uprostřed.



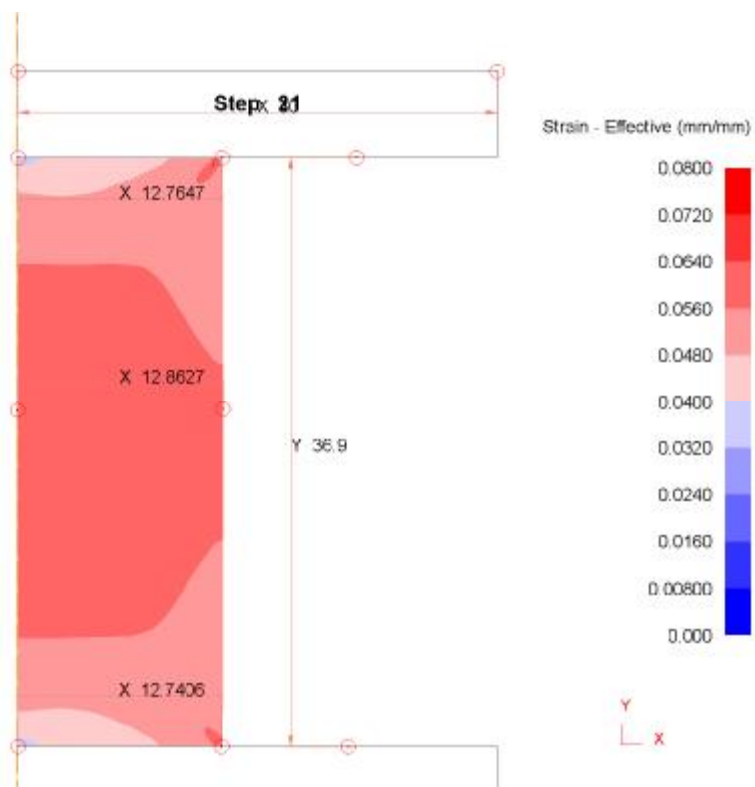


**Obr. 58** - Snímek naleptané struktury vzorku se stupněm deformace 43,7 % z oceli S235JR-C při zvětšení 100x - poloha uprostřed.

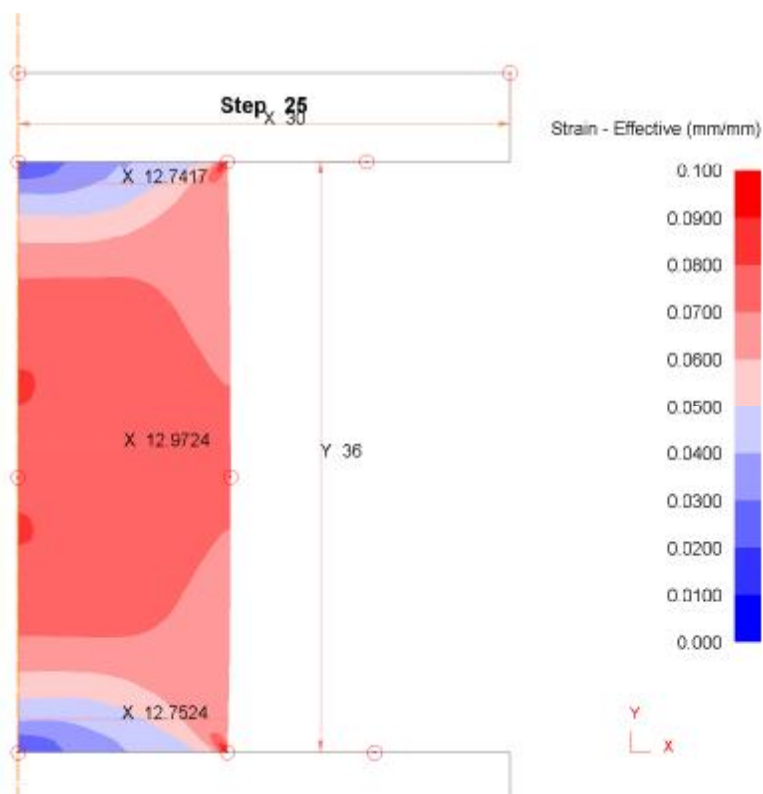


**Obr. 59** - Snímek naleptané struktury vzorku se stupněm deformace 53,1 % z oceli S235JR-C při zvětšení 100x - poloha uprostřed.

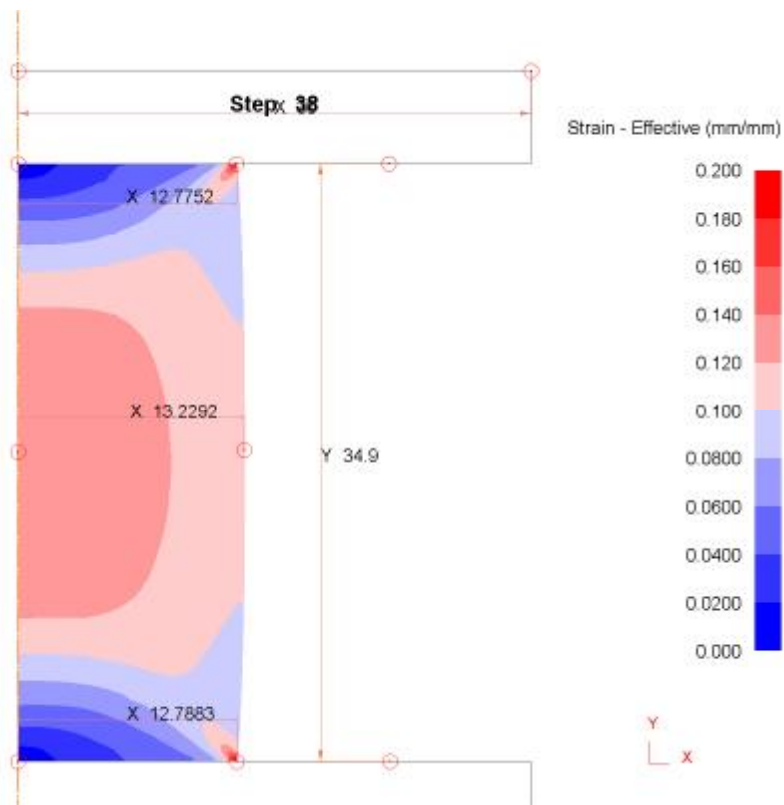
### PŘÍLOHA č. 3 - Simulace deformace



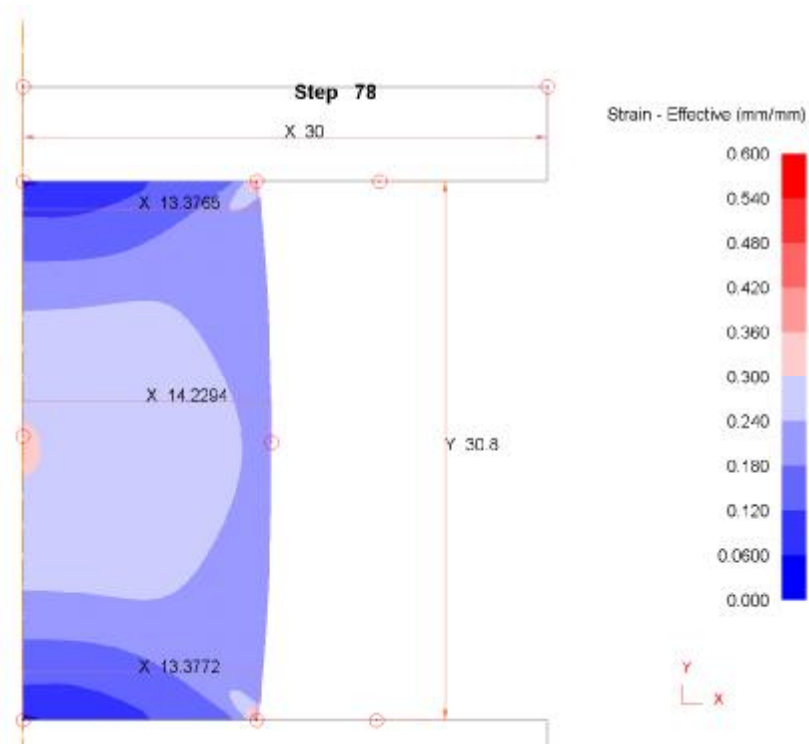
Obr. 60 - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 5 %.



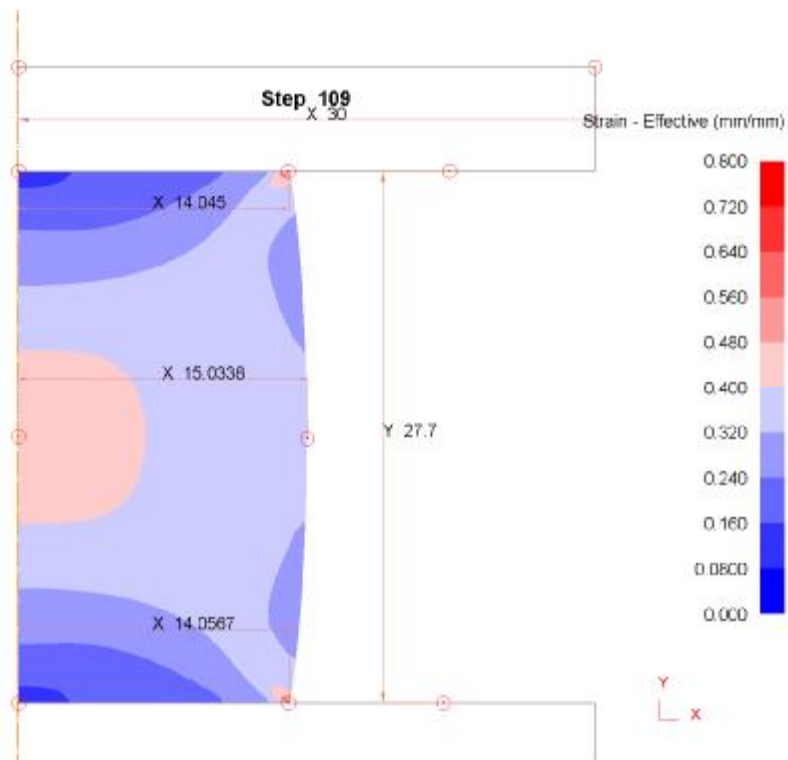
Obr. 61 - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 6,5 %.



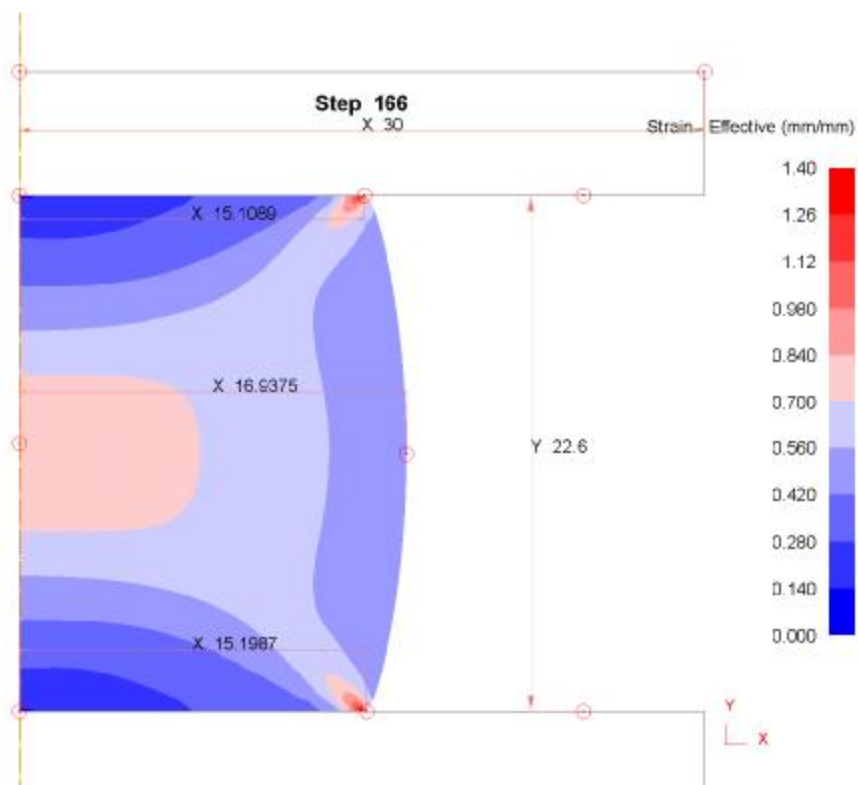
Obr. 62 - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 10 %.



Obr. 63 - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 20,5 %.

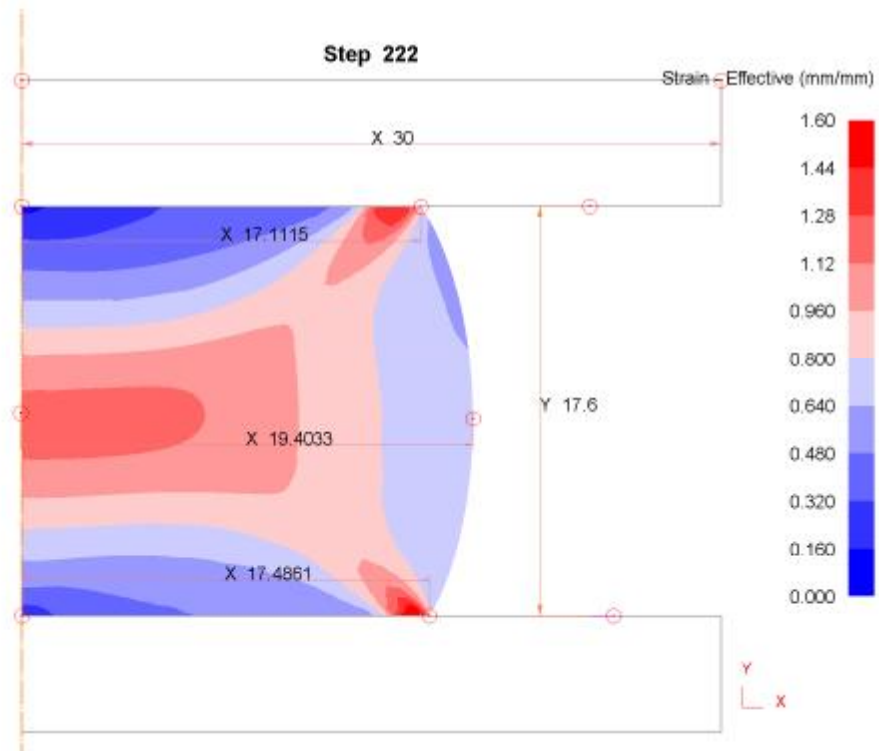


**Obr. 64** - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 28,5 %.



**Obr. 65** - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 42 %.





**Obr. 66** - Snímek ze simulace deformace vzorku z hliníkové slitiny - vzorek 2. série se stupněm deformace 55,5 %.