

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA FAKULTA STROJNÍ



VLASTNOSTI A ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ

ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A DEFECTOSKOPIE

doc. Ing. Halama Radim, Ph.D.
Ing. František Fojtík, Ph.D.
Ing. Martin Fusek, Ph.D.
Ing. Jaroslav Rojíček, Ph.D.
Dr. Ing. Ludmila Adámková

Ostrava 2013

© doc. Ing. Halama Radim, Ph.D., Ing. František Fojtík, Ph.D., Ing. Martin Fusek, Ph.D., Ing.
Jaroslav Rojíček, Ph.D., Dr. Ing. Ludmila Adámková

© Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava

ISBN 978-80-248-3027-8



Tento studijní materiál vznikl za finanční podpory Evropského sociálního fondu (ESF) a rozpočtu České republiky v rámci řešení projektu: CZ.1.07/2.2.00/15.0463, MODERNIZACE VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ A DIDAKTICKÝCH METOD

OBSAH

1	ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A DEFEKTOSKOPIE	3
1.1	ÚVOD.....	4
1.1.1	Příčiny vzniku a důsledky zbytkové napjatosti	4
1.1.2	Klasifikace zbytkových napětí.....	5
1.1.3	Experimentální metody stanovení zbytkových napětí.....	6
1.1.4	Nedestruktivní zkoušení materiálu	8
2	POUŽITÁ LITERATURA	16



1 ZBYTKOVÁ NAPĚTÍ A DEFEKTOSKOPIE



OBSAH KAPITOLY:

Příčiny vzniku zbytkových napětí

Klasifikace zbytkových napětí

Experimentální metody stanovení zbytkových napětí

Nedestruktivní zkoušení



MOTIVACE:

Ve většině případů se při návrhu a kontrole strojních součástí předpokládá, že materiál je izotropní a neuvažují se napětí, která vznikají v důsledku použité technologie výroby. Nicméně, použitá technologie výroby vždy vede ke vzniku jisté úrovně zbytkové napjatosti. Například při obrábění se velikost zbytkových napětí na povrchu součásti snižuje s velikostí úběru a minimální bude po aplikaci dokončovacích operací (broušení, leštění...).



Audio 1.1

Zbytková napětí jsou pak v praxi velmi častou příčinou vzniku zmetků při zavádění nových produktů, hrají také významnou úlohu při únavě materiálu, opotřebení funkčních povrchů, lze však také úmyslně v praxi indukovat zbytková tlaková napětí, která mají pozitivní účinek na uvedené degradační procesy (kuličkování, válečkování, vhodné tepelné zpracování). V této kapitole budou zbytková napětí kategorizována, včetně stručného popisu metod, které se k jejich stanovení nejčastěji v inženýrské praxi používají. Druhá část přednášky je věnována nedestruktivním metodám zkoušení, jenž umožňují nalezení vad v materiálu. Jejich znalost je také pro strojaře velmi důležitá.



CÍL:

Zbytková napětí. Kategorizace zbytkových napětí dle Macheraucha a Tietze. Metody stanovení zbytkové napjatosti.

Nedestruktivní metody zkoušení.



1.1 ÚVOD

V konstruktérské a výpočtářské praxi je obvykle materiál považován za homogenní izotropní kontinuum. Jak již bylo zmíněno v motivaci k přednášce, v konstrukčních materiálech existuje v důsledku jejich technologie výroby téměř vždy jistá zbytková napjatost a uvedený předpoklad tedy není splněn. V mnoha případech pak v praxi při opomenutí existence zbytkových napětí dochází k haváriím či zvýšení zmetkovitosti. Vysoké hodnoty zbytkových napětí mohou vést k vzniku trhlin v procesu výroby. Způsobům jejich detekce, defektoskopii, bude věnována až čtvrtá část této kapitoly.

1.1.1 Příčiny vzniku a důsledky zbytkové napjatosti

Připomeňme, že k deformaci těles a vzniku napjatosti dochází zejména z důvodu:

1. vzájemného silového působení těles
2. působení teplotního pole
 - o Homogenního (napjatost vzniká, je-li zabráněno teplotní dilataci tělesa)
 - o Nehomogenního (vznik napjatosti i v případě volné teplotní dilatace tělesa)

Není-li v daném případě splněna podmínka plasticity, jsou působící napětí v pružné oblasti a po odstranění příčiny svého vzniku napětí zcela vymizí.

Jestliže dojde ke vzniku pružně plastického stavu v některém bodě tělesa, potom po odstranění příčiny vzniku napjatosti (silová, deformační či teplotní), zůstanou v tělese jistá zbytková (residuální) napětí.

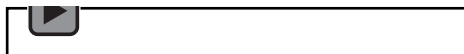
Zbytková napětí mohou být:

- 1) Užitečná – např. kuličkováním se vnesou tlaková napětí v povrchové vrstvě, která vedou k prodloužení životnosti součástí.
- 2) Škodlivá – vznik trhlin, napětíová koroze, snížení meze únavy či křehkolomové odolnosti (negativní vliv zejména u tahových zbytkových napětí).

Vysoká tahová napětí, vyvolaná například v okolí svarů chladnutím a fázovými transformacemi, mohou způsobit vznik trhliny i bez dodatečného působení vnějších sil.



Audio 1.2



Vyšetřování zbytkových napětí je tedy v technické praxi důležité.

Zahrnutí vlivu zbytkových napětí při výpočtovém posouzení konstrukce však není vždy jednoduché. V případě elastické napjatosti je možno uvažovat jejich superpozici s napětími od vnějšího působení. V pružně plastické oblasti se situace komplikuje vzhledem k tomu, že postupem doby dochází k relaxaci zbytkových napětí. Průběh tohoto procesu závisí na celé řadě faktorů – na amplitudě napětí, počtu cyklů, teplotě, stavu původní zbytkové napjatosti, vlastnostech materiálu, atd.



1.1.2 Klasifikace zbytkových napětí

Zbytková napětí je možno klasifikovat podle různých hledisek.

Významným hlediskem pro rozdělení druhů zbytkových napětí, působících v polykrystalických materiálech, je velikost objemů, v nichž se napětí nemění co do velikosti a směru, resp. podle Macheraucha a Tietze se uvádí:

- 1) Zbytková napětí I. druhu (makroskopická) – jsou přibližně homogenní v makroskopické oblasti (v mnoha zrnech) materiálu.
- 2) Zbytková napětí II. druhu (mikroskopická) – jsou přibližně homogenní v oblastech srovnatelných s velikostí jednotlivých zrn.
- 3) Zbytková napětí III. Druhu (submikroskopická) - jsou nehomogenní i v oblastech srovnatelných s meziatomovými vzdálenostmi.

Rozhodujícím rozměrem pro tuto klasifikaci zbytkových napětí je tedy velikost zrna uvažovaného materiálu. Zbytková napětí I. druhu jsou (podle obr. 1) střední hodnotou zbytkových napětí působících v mnoha zrnech. Zbytkové napětí II. druhu představuje rozdíly mezi zbytkovým napětím I. druhu a středními hodnotami zbytkových napětí v jednotlivých zrnech. Zbytková napětí III. druhu odpovídají změnám skutečných místních zbytkových napětí kolem zbytkových napětí II. druhu.

Zbytková napětí I. druhu mohou být způsobena například:

- výrobní technologií (obrábění, spojování, lití, tváření, tepelné zpracování, povrchové úpravy povrchu)
- montážním, dopravním, provozním, zkušebním či jiným zatížením různého charakteru

Zbytkové napětí II. druhu vznikají:

- při tepelných procesech v materiálu s fázemi majícími rozdílné hodnoty teplotních součinitelů délkové roztažnosti
- při deformaci materiálu skládajícího se buď z jedné fáze (jejíž zrna jsou však různě orientovány k silovému toku a jejichž mez kluzu je anizotropní) nebo z více fází s různými mech. vlastnostmi

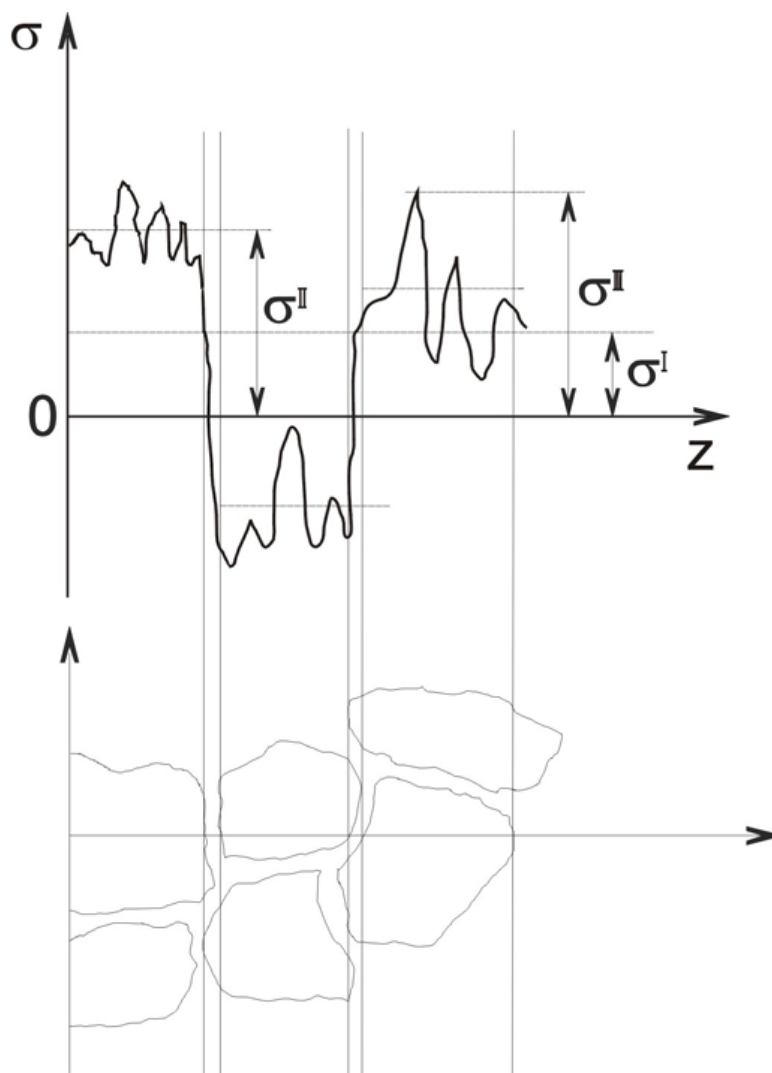
Zbytková napětí III. druhu:

- jsou důsledkem strukturních poruch (bodových, čárových,...)



Audio 1.3



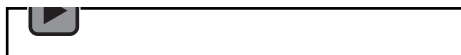


Obrázek 1 Kategorie zbytkových napětí

Zbytkové napětí v určitém bodě tělesa je vždy superpozicí všech uvedených tří druhů. **I když** v některých případech mohou být zbytková napětí I. a II. druhu nulová, jsou zbytková napětí III. druhu v technické praxi vždy nenulová. Přitom znalost velikostí těchto jednotlivých druhů napětí není pro konstruktéra nebo výpočtáře (při posuzování spolehlivosti konstrukce) vždy stejně důležitá. Tak na příklad u kompozitních materiálů může být zajímavá velikost zbytkových napětí II. druhu; u kovových materiálů se pozornost soustřeďuje především na vyšetření makroskopických zbytkových napětí a zbytková napětí II. a III. druhu jsou považována za nepodstatná.



Audio 1.4



U technických materiálů přichází vždy v úvahu superpozice zbytkových napětí různých druhů i odlišných příčin vzniku; na tuto skutečnost by se nemělo zapomínat.

1.1.3 Experimentální metody stanovení zbytkových napětí

Podle charakteru napjatosti, který jsou schopny detekovat, rozlišujeme metody pro stanovení zbytkové napjatosti:

- na povrchu tělesa a to buď pouze jednoosé nebo dvouosé (rovinné),



- v jistém objemu tělesa – tedy stanovení napjatosti trojosé (prostorové).

Podle míry narušení celistvosti vyšetřovaného tělesa rozlišujeme metody:

- 1) Destruktivní – úplné znehodnocení tělesa (např. rozřezávací metoda)
- 2) Polodestruktivní (semidestruktivní) – pouze částečné znehodnocení tělesa, nemající vliv na jeho funkci a spolehlivost, příp. lze znehodnocení odstranit.
- 3) Nedestruktivní – využití ultrazvuku, RTG paprsků, neutronové difrakce...

Podle principu pak máme metody:

1. Mechanické
 - např. metoda odvrtání otvoru (obr. 2)
2. Fyzikální
 - difrakční, ultrazvukové, magnetické...
3. Chemické
 - využívají změn vyvolaných chemickými procesy.



Obrázek 2 Aplikace metody odvrtání otvoru u bandážovaných válců

Destruktivní dělicí metoda je dodnes standardizována například pro měření zbytkových napětí u kolejnic a železničních kol. Využívá se při ní odporové tenzometrie.

Nejpoužívanější semidestruktivní metodou je metoda odvrtání kruhového otvoru. Princip metody je jednoduchý. V místě na povrchu součásti, kde mají být zbytková napětí stanovena, je nalepena speciální tenzometrická růžice pro měření zbytkových napětí. Ve středu této růžice se pak buďto postupně anebo najednou vyvrtá kruhový otvor, jehož hloubka a průměr jsou zpravidla stejně velké. Tím se zbytková napětí v okolí kruhového otvoru uvolní a pomocí tenzometrů nalepené růžice lze změřit velikost uvolněných deformací ve třech místech v okolí

kruhového otvoru. Na základě změřených uvolněných deformací lze pak vyhodnotit velikost původních zbytkových napětí. Provádí – li se vrtání kruhového otvoru postupně, lze vyhodnotit i průběh zbytkových napětí podél vrtané hloubky pod povrchem součásti.

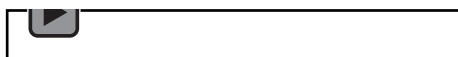
Ultrazvukové metody jsou založeny na přibližně lineární změně rychlosti šíření zvuku v kovech v závislosti na namáhání. Tento jev bývá nazýván akustoelastickým jevem.

Nejčastěji používanou difrakční metodou je rentgenová difrakce. Rentgenovým (RTG) zářením se rozumí elektromagnetické záření s vlnovými délkami kratšími než záření ultrafialové. Zpravidla se obor RTG záření vymezuje intervalem vlnových délek (0,001 – 5) nm. Difrakce RTG paprsků v polykrystalických materiálech bývá nejčastěji popisována Braggovou představou. Difraktovaný paprsek vzniká „odrazem“ od určité soustavy rovnoběžných rovin, v nichž jsou atomy v krystalu lokalizovány. Dopadající i difraktovaný paprsek svírají s uvažovanou soustavou rovin stejný úhel odpovídající zákonu odrazu. Pomocí RTG metody můžeme určit vzdálenost atomových rovin a jejich změny v důsledku pružných deformací.

Chemické metody využívají změn vyvolaných chemickými procesy, jako jsou koroze pod napětím či difúze vodíku do povrchové vrstvy.



Audio 1.5



Přehledně jsou parametry čtyř nejčastěji aplikovaných metod uvedeny v tabulce 1.

Metoda	dělicí	odvrtávací	rentgenografická	ultrazvuková
Základní předpoklad	prostorová napjatost	rovinná napjatost	izotropní homogenní materiál, polykrystalický, jemnozrnný	izotropní homogenní materiál, homogenní napjatost
Kategorie zbytkových napětí	I. druhu	I. druhu	I. a II. nebo III. druhu	I.+II. +III. druhu
Měřený parametr	povrchové přetvoření nebo deformace	povrchové přetvoření nebo deformace	změna meziatomových vzdáleností polykryst.mater.	změna rychlosti ultrazvukových vln
Min. velikost vyšetřované oblasti	100mm ²	0,5mm ²	0,5mm ²	obvykle 30mm ²
Minimální analyzovaná hloubka	1-2mm	20mm	několik mm	15-300 mm
Problémy s hrubozrnností	ne	ne	Ano	ano

Tab. 1 Srovnání vybraných metod měření zbytkových napětí

1.1.4 Nedestruktivní zkoušení materiálu

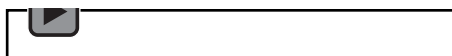
Defektoskopie slouží ke zjišťování skrytých (obvykle vnitřních) vad v materiálu – jedná se o dutiny, trhliny, rozměrné nekovové vměsky v kovovém materiálu, apod. Defektoskopie



umožňuje zvyšovat bezpečnost provozu exponovaných součástí a tím i celých zařízení. Při studiu metod nedestruktivního zkoušení materiálu je nutné zvládnout zejména fyzikální podstatu každé metody a z ní vyplývající omezení použití (vhodnost použití pro nalezení konkrétního typu vady).



Audio 1.6

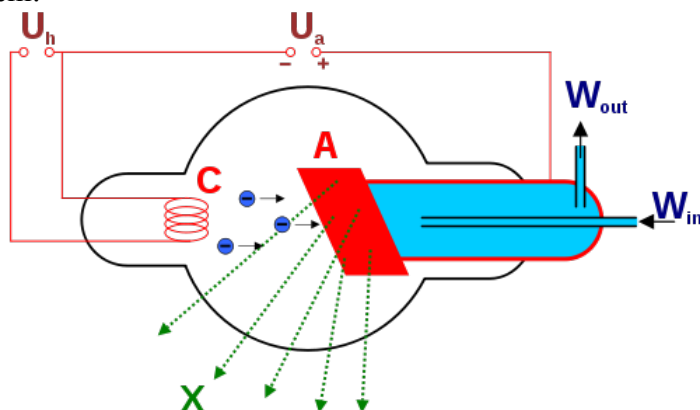


Zkoušení rentgenovým zářením

Rentgenové záření je elektromagnetické vlnění s vlnovou délkou 10^{-12} až 10^{-8} m. Záření má biologické účinky. Vzniká v *diodě* (obr.3), jenž je evakuovanou nádobou, na jejíž elektrody je přiváděn stejnosměrný proud o napětí několika set kilovolt. Elektrony, emitované katodou, se dopadem na anodu zbrzdí – jejich kinetická energie se z 99% přemění na teplo a z cca 1% na rentgenové záření.

C – katoda

A – anoda



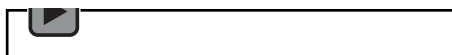
W_{in} , W_{out} – vstup a výstup
chladicí kapaliny

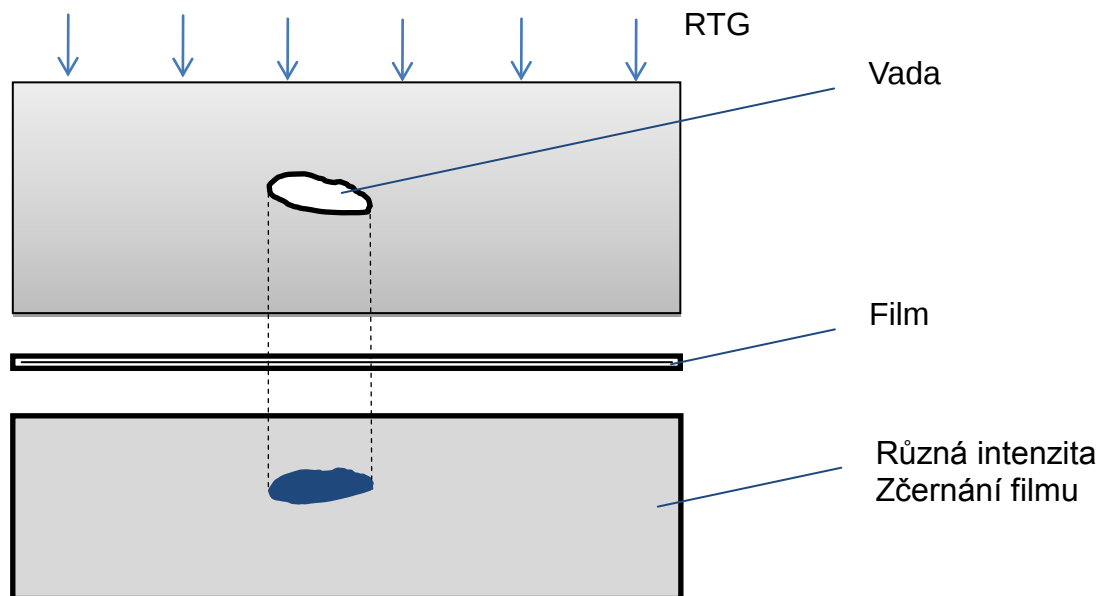
Obrázek 3 Schéma diody

Princip metody spočívá v zeslabení intenzity rentgenového záření při průchodu zkoušeným materiálem, viz obr. 4. Rentgenograficky se běžně kontrolují svary, odlitky z těžkých i lehkých kovů. RTG záření třisetkilovoltové aparatury může prozářit ocel do tloušťky asi 100mm. Pro větší tloušťky jsou nutné megavoltové aparatury.



Audio 1.7





Obrázek 4 Schéma zkoušení RTG záření

Zkoušení zářením gama

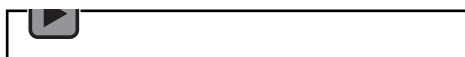
Gama záření je podobně jako rentgenové záření elektromagnetické vlnění s velmi malými vlnovými délkami a vzniká rozpadem některých radioaktivních prvků.

Využívá se nejčastěji radioaktivní izotop *kobaltu 60*, *cesia 137* nebo *iridia 192*. Tyto izotopy se ve tvaru válečků průměru 2 až 10 mm vkládají do pouzder z lehkých slitin (a ochranných krytů), které se pak ovládají dálkově.

Zobrazování se děje na rentgenový film. Užívá se tam, kde není možné použít RTG záření, např. z prostorových důvodů.



Audio 1.8



Zkoušení ultrazvukem

Ultrazvukem nazýváme zvukové kmity o frekvenci větší než 20 kHz a vlnové délky $1,6 \text{ až } 0,3 \times 10^{-6} \text{ m}$. V defektoskopii – frekvence od 1 do 25 MHz.

Podle směru šíření rozeznáváme ultrazvukové vlny:

- podélné
- příčné
- povrchové
- deskové

Rychlost podélných vln ve vybraných prostředích:

Hliník Al... 6300 m/s



Oceli... 5900 m/s
 Olovo Pb... 2160 m/s
 Voda... 1483 m/s
 Vzduch... 330 m/s

Mezi rychlostí šíření ultrazvukových vln v , jejich vlnovou délkou λ a frekvencí f platí vztah

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (10.1)$$

Při přechodu z jednoho prostředí do druhého nastává na jejich rozhraní odraz a lom. Poměr intenzity odražené vlny I k intenzitě vlny dopadající na rozhraní I_0 je tzv. součinitel odrazu

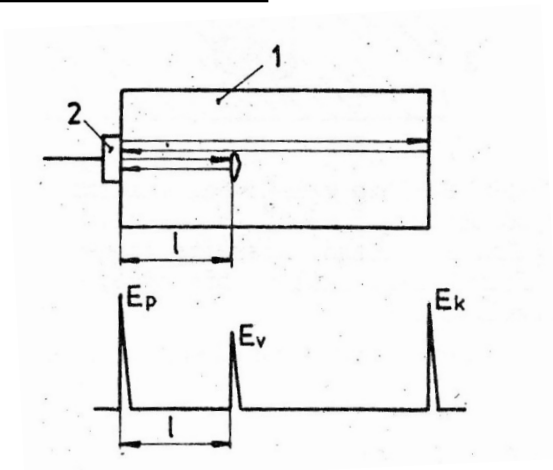
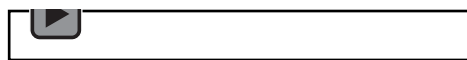
$$R = \frac{I}{I_0} = \left(\frac{m-1}{m+1} \right)^2 \quad (10.2)$$

kde $m = \rho_1 v_1 / \rho_2 v_2$ je poměr akustických vlnových odporů obou prostředí (ρ je hustota prostředí). Výhodou zkoušení ultrazvukem je možnost pořízení přenosných defektoskopů a nižší pořizovací náklady. Často se u přenosných ultrazvukových přístrojů používá odrazová metoda (obr.5), u které výška echa ukazuje na velikost vady (odpovídá podílu energie odražené části svazku ultrazvukových vln).

Naopak průchozí metoda (obr. 6) se často používá na automatizovaných linkách, např. zkoušení plechů ve válcovnách.



Audio 1.9



1 – zkoušený předmět

2 – ultrazvuková sonda

E_p – počáteční echo

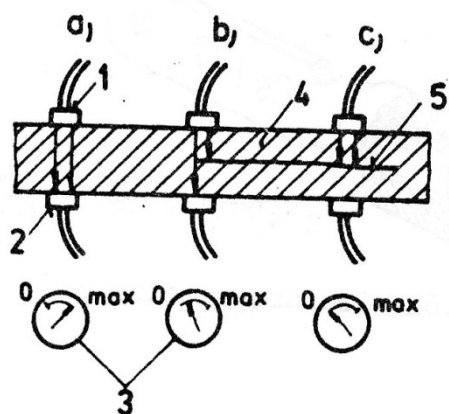
E_v – poruchové echo

E_k – koncové echo

l – vzdálenost vady od povrchu

Obrázek 5 Impulzní odrazová metoda





- a) materiál bez vady
 b) zachycení počátku vady
 c) materiál s vadou
 1, 2 - vysílací resp. přijímací sonda
 3 - ručkový měřicí přístroj
 4 - zkoušený předmět
 5 – vnitřní vada

Obrázek 6 Průchozí ultrazvuková metoda

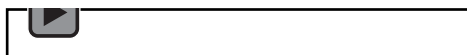
Zkoušení vířivými proudy

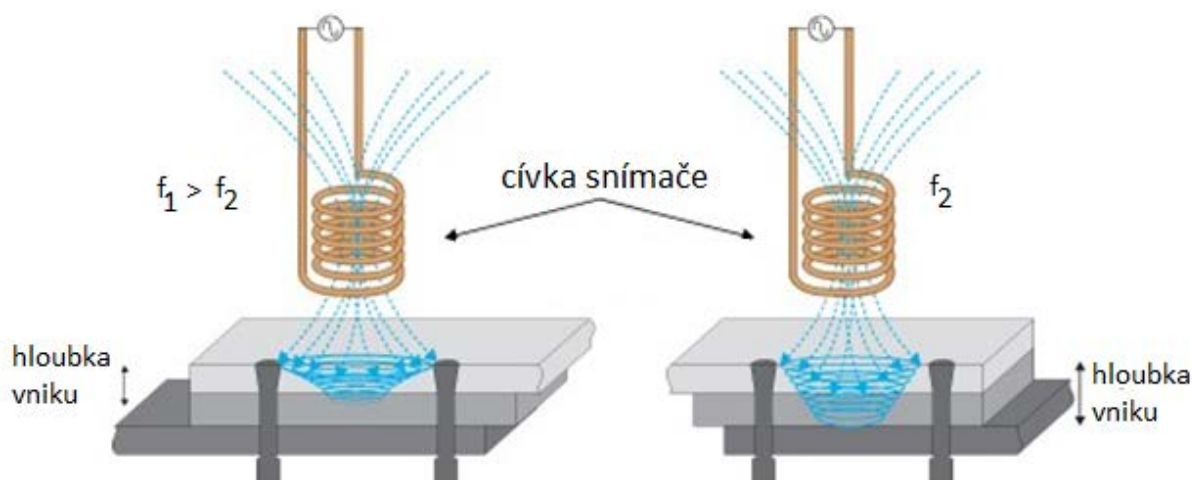
Metoda vířivých proudů (angl. Eddy Current Method) je založena na vniku elektromagnetického pole do elektricky vodivého materiálu, které v materiálu indukuje elektrický tok, nebo-li vířivé proudy. Tyto vířivé proudy opětovně vytvářejí magnetické pole, které působí proti magnetickému poli, jež ho vyvolalo. Podmínkou vzniku vířivých proudů je existence časově proměnného magnetického pole. Výhodou této metody je možnost zkoušet magnetické i nemagnetické materiály. Metoda umožňuje nejen vyhledávání necelistvostí v materiálu, ale také kontrolovat fyzikální vlastnosti materiálu.

Základem měřicí aparatury je snímač ve tvaru tužky (pro případ ručního měření), který má ve svém hrotu umístěnou malou cívku, napájenou proudem o určité frekvenci. Hloubka, do jaké jsou schopny vířivé proudy proniknout je mimo jiné závislá na frekvenci budícího proudu. Nastavením vyšší budící frekvence napájecího proudu dosáhneme menší hloubky vniku vířivých proudů, zato však větší hustoty těchto proudů u povrchu, díky které bude snímač citlivější na povrchové vady. Obrázek 7 názorně demonstruje hloubku vniku v závislosti na zvolené frekvenci budícího proudu.



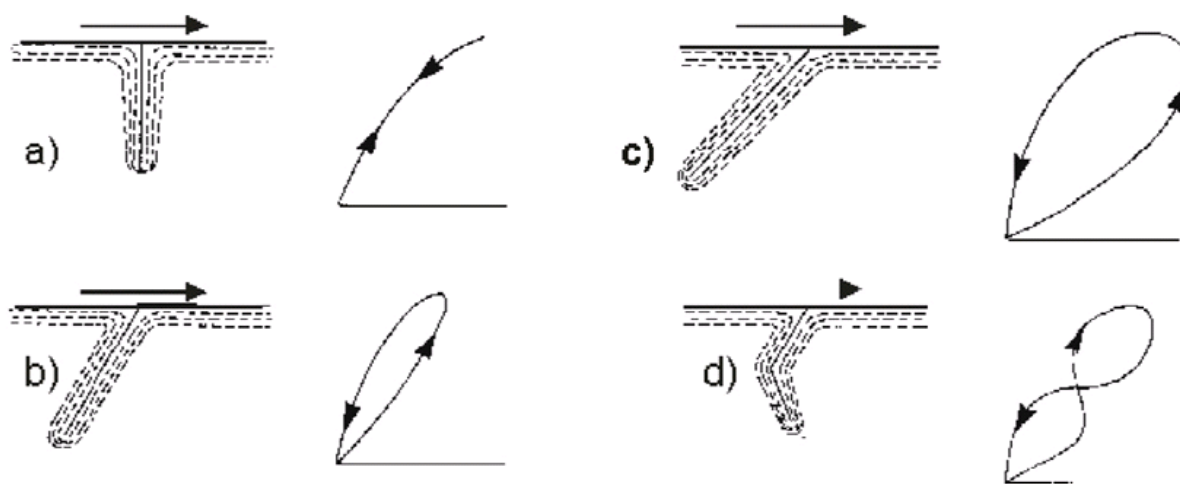
Audio 1.10





Obrázek 7 Hloubka vniku v závislosti na budící frekvenci

Bude-li se na zkoumaném povrchu nacházet trhlina, dojde k prodloužení dráhy, kterou musí vířivý proud vykonat. V důsledku prodloužení smyčky vířivého proudu, dojde ke snížení proudové hustoty, což se projeví posunem indikačního bodu na obrazovce přístroje. Na obrázku 8 jsou uvedeny indikace trhlín v závislosti na jejich poloze vůči zkoušenému povrchu (dráha, po jaké se pohybuje indikační bod, jestliže projíždíme snímačem nad trhlinou).



Obrázek 8 Indikace trhlín v závislosti na orientaci vůči zkoušenému povrchu

Magnetická prášková metoda

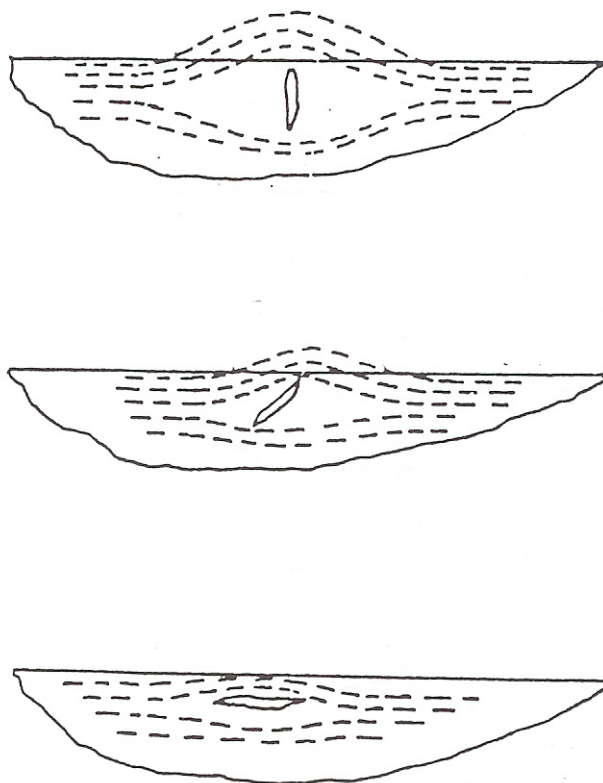
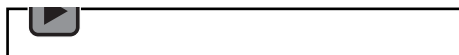
Magnetická prášková metoda využívá fyzikálních vlastností feromagnetických ocelí. Magnetujeme-li feromagnetický materiál, pak v místě necelistvosti, vlivem zvýšeného magnetického odporu dojde ke vzniku rozptylového magnetického pole. Toto rozptylové magnetické pole u trhlín, které souvisí s povrchem, nebo leží těsně pod povrchem, vystupuje do okolního prostoru, kde ho můžeme detekovat. Detekovat rozptylové magnetické pole, jež vystoupilo do okolního prostoru, je možné například pomocí feromagnetické suspenze (kapalina, ve které je ocelový prášek). Máme-li suspenzi s černým magnetickým práškem, trhliny se nám budou indikovat jako černá místa na zkoušeném povrchu vlivem nahromadění



magnetického prášku v jejich okolí. Magnetická prášková metoda je určena pro lokalizaci povrchových a těsně podpovrchových vad, především plošného charakteru, jako jsou trhliny, studené spoje apod.



Audio 1.11



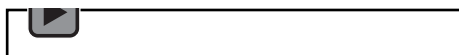
Obrázek 9 Reakce rozptylového pole na necelistvost v materiálu

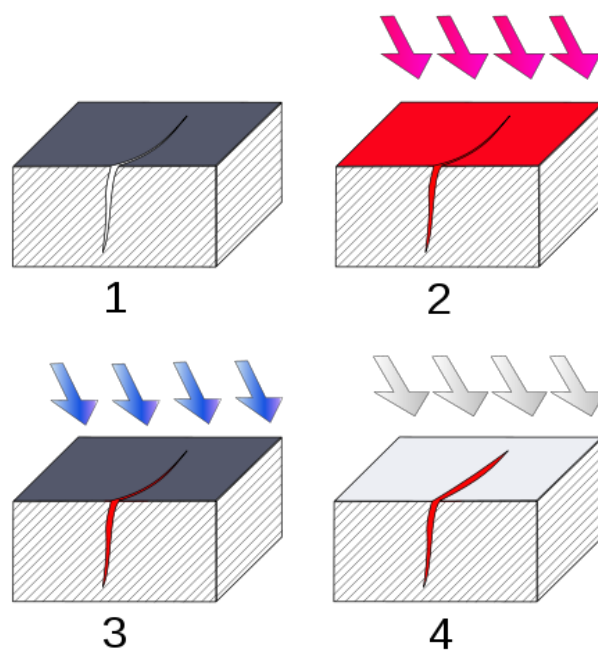
Kapilární metody

Kapilárními metodami se zjišťují povrchové vady. Princip je zřejmý z obr.10. Detekční tekutina vnikne do otevřených vad, které s povrchem souvisejí (2). Po opláchnutí (3) vystoupí detekční tekutina vzlínávaností za pomoci vývojky k povrchu a indikuje vadu (4). Jako vývojka se používá oxid hořečnatý rozptýlený v lihu či acetonu. Detekční tekutina je pak například petrolej obarvený anilinovým barvivem.



Audio 1.12





Obrázek 10 Znázornění principu kapilární metody

2 POUŽITÁ LITERATURA

- [1] SILBERNAGEL, A.: Nauka o materiálu I, skripta FS VŠB – TU Ostrava, 2000, 150 s.
- [2] VLK a kol.: Experimentální mechanika. Kapitola 6.1 Úvod do problematiky experimentálního určování zbytkových napětí. VUT Brno, s. 119-123.,
<http://www.umt-old.fme.vutbr.cz/studium/opory/Experimentalni_mechanika.pdf
- [3] PLUHAŘ, J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL, Praha, 1989, 552 s.

Internet

- [4] Matematika pro inženýry 21 století
Modul Pružnost a pevnost
<http://mi21.vsb.cz/modul/pruznost-pevnost>

