

NETISKNOUT!
Titulní list

NETISKNOUT!
Zadání

NETISKNOUT!

Licenční smlouva - oboustranně

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá aplikací vybraných metod nedestruktivního zkoušení při řízení jakosti výroby ocelových odlitků ozubených kol. Popisuje princip zjišťování vad danými metodami, následné určování příčin vzniku vad a návrhy optimalizace výrobního procesu pro zvyšování jakosti výroby.

Klíčová slova

Defektoskopie, nedestruktivní zkoušení, ultrazvuk, magnetická zkouška, kontrola jakosti, vady, trhliny, ocelové odlitky.

ABSTRACT

This diploma thesis resolves application of particular non-destructive testing methods while producing castings of steel wheels and quality control of this process. There are described fundamentals of flaw detection, determination of flaw-generation cause and suggestions for optimization of casting process and increasing of its quality.

Key words

Defectoscopy, non-destructive testing, ultrasonic, magnetic particle inspection, quality control, defects, cracks, steel castings.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KREJČÍ, Martin. *Nedestruktivní zkoušení odlitek ozubených kol*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009, 68 stran. Vedoucí práce: prof. Ing. Jaroslav Čech, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Nedestruktivní zkoušení odlitků ozubených kol vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto jmenovitě profesoru Čechovi, jakožto vedoucímu práce a dále panu Jaškovi, Syptákovi a dalším pracovníkům Královopolské Slévárny za poskytnuté informace a cenné připomínky při zpracovávání diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt.....	4
Prohlášení.....	5
Poděkování.....	6
Obsah.....	8
Úvod.....	9
1 Historie NDT technologií.....	10
2 Zkoušky magnetickou metodou práškovou.....	11
2.1 Způsoby magnetování.....	11
2.2 Detekční suspenze.....	16
3 Zkoušky ultrazvukem.....	18
3.1 Zkušební metody.....	18
3.2 Vlastnosti UZ vlnění.....	19
3.3 Zařízení pro UZ defektoskopii.....	22
3.4 Vyhodnocování vad.....	25
4 Sledovaný slévárenský proces.....	29
4.1 Odlévaná slitina.....	30
4.2 Technologie lití.....	33
4.3 Aplikace NDT.....	34
4.3.1 Použitá technika.....	34
4.3.2 Postup.....	35
4.3.3 Detekované vady.....	36
5 Kontrola a řízení jakosti.....	36
5.1 Identifikace vad.....	37
5.2 Identifikace příčin.....	39
5.3 Optimalizace výrobního procesu.....	47
Závěr.....	49
Seznam použitých zdrojů.....	50
Seznam příloh.....	52
Přílohy.....	53

ÚVOD

Technologie nedestruktivního zkoušení, dále jen NDT (z anglického: Non-Destructive Testing), je soubor metod určených pro kontrolu jakosti průmyslové výroby. Zahrnuje řadu postupů založených na rozdílných fyzikálních a chemických principech, které dovolují odhalovat vady na povrchu i uvnitř objemu materiálu.

Při konstrukci strojních součástí jsou kladeny stále vyšší požadavky na dané součásti a tedy i použité materiály, často až na hranici jejich možností. Z toho vyplývá, že nedestruktivní kontrola začíná mít zcela nazastupitelnou roli v kontrole a řízení jakosti ve všech výrobních průmyslových podnicích, kterým záleží na kvalitě výrobků, a tedy i dlouhodobé spokojenosti zákazníků.

Slévárenství je ze své podstaty složitá výrobní technologie, která s sebou nese riziko možného vzniku mnoha vad, typických a charakterově rozdílných v závislosti na konkrétní použité slévárenské technologii, konstrukci odlitku, odlévané slitině a podmínkách lití. Je-li kontrola jakosti požadována pro konkrétní odlitek přímo zákazníkem, nabízí NDT řadu možností, jak tuto kontrolovat. Stejně tak je často i pro slévárnu samotnou výhodné aplikovat při kontrole jakosti odlitků nedestruktivní zkoušení z vlastní iniciativy. Tento přístup umožňuje odhalit včas vady, které by následně mohl zjistit zákazník až při následném opracování odlitku, či až při jeho použití jako hotového výrobku a takový odlitek reklamovat. Díky včasnému odhalení vady ještě ve slévárně je možno tomuto předejít. Dalším důvodem, kromě včasného odhalení vady, kdy ještě nezpůsobuje takovou finanční ztrátu, je možnost zvyšování jakosti výroby. K tomuto je krom lokalizace vady zapotřebí určit druh vady a příčinu jejího vzniku. Je-li známa příčina vzniku, pak je většinou možné upravit výrobní proces tak, aby se vznik dané vady omezil. Zavedení NDT postupů pro kontrolu libovolného odlitku však nemusí být vždy ekonomicky výhodné. Je potřeba zvážit možné přínosy a naproti tomu i náklady, spojené s použitím nedestruktivního zkoušení pro každý jednotlivý odlitek.

Tato práce se konkrétně zabývá aplikací NDT metod při malosériové výrobě těžkých ocelových odlitků ozubených kol v Brněnské slévárně KRÁLOVOPOLSKÁ SLÉVÁRNA s.r.o. Při jejich výrobě se pravidelně vyskytují obdobné vady, jejichž přítomnost je NDT zjišťována, dále analyzován charakter, stanovována možná příčina vzniku a možnosti úpravy výrobní technologie pro zamezení jejich výskytu. Úvodní kapitoly se zaměřují na základní popis konkrétně používaných metod NDT, dále je rozebrán sledovaný proces lití a aplikace NDT a následných postupů kontroly jakosti a navrhované způsoby optimalizace výrobního procesu.

1 HISTORIE NDT TECHNOLOGIÍ

Za historický počátek NDT se zpravidla pokládá objev rentgenového záření 8. 11. 1895 německým profesorem fyziky Wilhelmem Conradem Röntgenem, které poprvé umožnilo nazírat do nitra objektů (např. odlitků nebo výkovků, ale i velkých a složitých výrobků a zařízení), aniž by je bylo za tím účelem třeba provrtat, rozřezat nebo jinak porušit. Paprsků X bylo prvně užito pro medicínské aplikace. Technická radiografie začala paprsky prostupující pevnými látkami využívat o pár let později, na začátku 20. století. Historie zprvu slyšitelné akustické defektoskopie se datuje do doby před druhou světovou válkou, kdy bratři Krautkrämerové u německé firmy Krupp Essen zjišťovali kvalitu výrobků na základě akustické vodivosti. Kladívkem oťukávali různé výrobky a mikrofonom zjišťovali, jak je testovaná součást místně akusticky vodivá. Kvalitu výrobku výsledně hodnotili pouze na slyšitelných frekvencích, tj. frekvencích řádově v Hz a výjimečně v kHz. Využití ultrazvuku pro zjišťování objektů uvnitř materiálu bylo inspirováno objevem sonaru, techniky vysílání zvukových vln vodou a pozorováním návratových ech, před druhou světovou válkou. Teoretické počátky dala studie ultrazvukových vln pro použití v defektoskopii patentovaná S. Ya. Sokolovem v roce 1936. V té době ovšem nebyla technika na takové úrovni, aby bylo možno sestrojít zařízení k vysílání vln o dostatečně vysoké frekvenci. Prvního skutečného uplatnění tak dostal až krátce po válce v Japonsku, kde byla poprvé vyzkoušena možnost lékařské diagnostiky pomocí ultrazvuku. Současná průmyslová ultrazvuková defektoskopie doznala rozvoje teprve až po vývoji vysokofrekvenčních elektronických obvodů. Takto již optimálně pracuje s frekvencemi v megahertzovém pásmu a umožňuje detekci i jednotlivých vad o velmi malých rozměrech. Ve dvacátých letech minulého století zjistil William Hoke, že magnetické částičky (obarvené ocelové piliny) mohou být použity v souvislosti s magnetismem jako způsob lokalizace defektů. Hoke objevil, že povrchové, nebo i podpovrchové trhliny v zmagnetizované součásti způsobují distorzi a rozšíření magnetického pole mimo součást. Tento jev zpozoroval v dílně, kde se na magneticky upnutém obrobku formovaly ocelové špony do vzoru korespondujícího s povrchovými trhlinami. Tímto objevem byl dán základ magnetické práškové metodě, kterou u nás dále rozvíjel ve druhé polovině dvacátých let minulého století Ing. Karásek. Na rozvoj NDT technologií měl největší vliv rychlý vývoj elektroniky v posledních desetiletích a zejména nástup počítačů. [1], [2], [3], [4]

Metody současného nedestruktivního zkoušení se obecně dělí dle možnosti zjišťovaných vad na zkoušky povrchové, ultrazvukové a prozařovací, přičemž poslední dvě slouží k zjišťování vad pod povrchem součástí. Každá z těchto skupin obsahuje další dělení na jednotlivé konkrétní postupy. V případě výrobního procesu sledovaného v této práci jsou aplikovány dvě zkušební metody, a to ultrazvuková a magnetická prášková, která se řadí mezi zkoušky povrchové. Následující kapitoly se budou postupně zabývat základními principy obou těchto zkušebních metod.

2 ZKOUŠKY MAGNETICKOU METODOU PRÁŠKOVOU

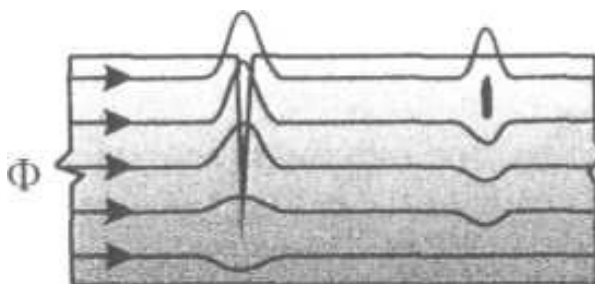
Magnetické metody zkoušení materiálu jsou zkušební postupy založené na využití magnetického rozptylu, způsobeného necelistvostí materiálu. Slouží pro zjišťování především plošných vad (trhliny, studené spoje, apod.) umístěných na povrchu nebo těsně pod povrchem zkoušeného materiálu. Radí se tedy mezi zkoušky povrchové. [5]

Základní podstatou je vyvolání rozptylu magnetického pole vlivem necelistvosti součásti. Nalézají-li se ve zmagetovaném předmětu magnetická nehomogenita, způsobená necelistvostí, zvětšuje se v tomto místě magnetický odpor. V takovém případě část magnetického toku v blízkosti necelistvosti vychází do okolního prostředí, čímž nastane rozptyl magnetického pole. Tento je závislý na velikosti, tvaru a poloze necelistvosti ve zkoušeném předmětu a na hodnotě magnetické indukce, na níž je předmět zmagetován. Největšího rozptylu se dosahuje u trhlin plošného charakteru, které jsou umístěny kolmo ke směru magnetického toku jdoucího předmětem. Rozptyl rychle klesá, vzrůstá-li vzdálenost vady od povrchu materiálu, nebo čím více směr necelistvosti splývá se s měrem magnetického pole. K vytvoření rozptylového pole v místě vady je nutno zkoušený předmět zmagetovat, a to kolmo na směr zjišťované necelistvosti. K tomu slouží dva základní magnetovací způsoby: pólové a cirkulární magnetování. [5]

2.1 Způsoby magnetování

Pólové magnetování (viz Obr.2.1.1) je způsob, při němž se na koncích nebo alespoň na části zkoušeného předmětu vytvářejí magnetické póly buď trvale, nebo jen po určitou dobu. Vytvořené magnetické pole je většinou rozloženo ve směru podélné osy předmětu, a proto se toto magnetování nazývá též podélné. Tímto způsobem se zjišťují příčné necelistvosti, tj. uložené kolmo na osu předmětu. Pólové magnetování rozdělujeme na magnetování jhem a cívkové magnetování. [5]

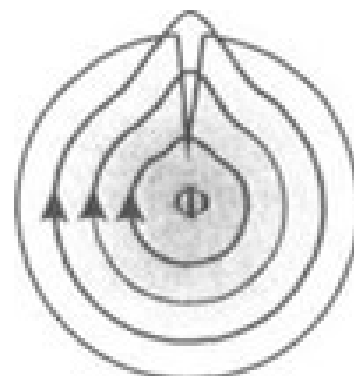
Obr.2.1.1: Rozptylové magnetické pole nad defektem. Příčně orientovaná povrchová trhlina a podpovrchový defekt při pólovém magnetování. [6]



Cirkulární magnetování (viz Obr.2.1.2) je způsob, při němž se využívá magnetických účinků elektrického proudu. Na rozdíl od pólového magnetování v předmětu nevznikají výrazné póly a magnetické pole tvoří uzavřené dráhy, jejichž roviny jsou kolmé ke směru proudu. Protože proud obvykle protéká předmětem ve směru jeho podélné osy, je jím vytvořené magnetické pole příčné a zjišťujeme jím podélné necelistvosti. Proto se tento způsob nazývá také příčné, nebo proudové magnetování. Cirkulární magnetování rozdělujeme

na: magnetování průchodem proudem, magnetování pomocným vodičem a magnetování indukcí proudů v předmětu. [5]

Obr.2.1.2: Rozptylové magnetické pole nad defektem. Podélně orientovaná povrchová trhлина při cirkulárním magnetování. [6]



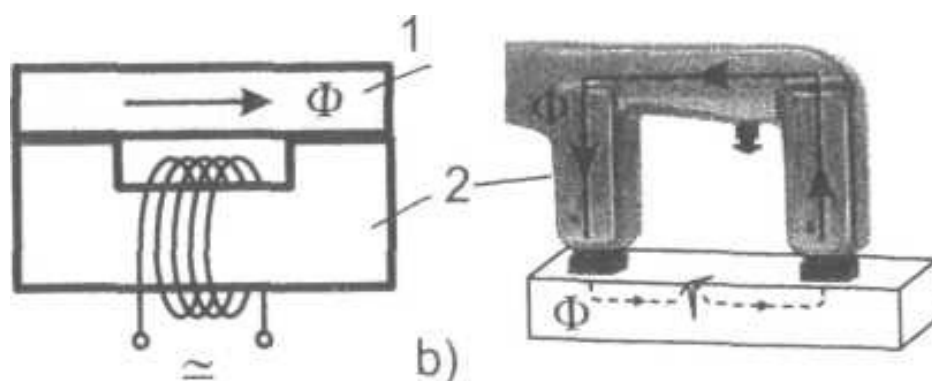
Dalším způsobem je impulsní magnetování, které může být jak pólové, tak cirkulární. Je-li předmět magnetován současně pólově i cirkulárně, jedná se o kombinované magnetování, kterým lze zjistit příčné i podélné nečelivosti v jedné pracovní operaci. [5]

Pro buzení magnetického pole ve zkoušeném předmětu se používá střídavého i stejnosměrného proudu. Na druhu proudu závisí průnik magnetického pole do materiálu, s čímž souvisí jak zjistitelnost podpovrchových nečelivostí, tak nároky na odmagnetování tělesa. Střídavý proud o frekvenci 50Hz je používán téměř u všech druhů magnetovacích přístrojů. Výhodou je vedení jen ve slabé povrchové vrstvě materiálu (skin effect), proto proto nezmagnetuje větší část průřezu tělesa, takže odmagnetování většinou není obtížné. U součástí rotačně symetrického tvaru magnetovaných průchodem proudem, nebo pomocným vodičem často není třeba vůbec odmagnetovat. Naproti tomu nevýhodou je nezjistitelnost hlouběji uložených nečelivostí a značné ohřátí výrobku při delším magnetování. Stejnosměrný proud je používán zřídka, většinou pouze u ručních elektromagnetů, které mohou být napájeny z akumulátoru. Tento proud je veden celým průřezem tělesa, a proto je také celý průřez tělesa magnetován. Výhodou je zjistitelnost i podpovrchových nečelivostí (v závislosti na rozměrech vady) a to, že při magnetování rozměrných součástí nevznikají ztráty výřivými proudy a ohřevem. Nevýhodou je obtížnější magnetování, robustnější přístroje, menší možnost využití vzhledem ke zdroji proudu. Z uvedených důvodů se pro stejnosměrné magnetování užívají častěji usměrněné proudy, které kombinují vlastnosti stejnosměrného i střídavého magnetování. [5], [6]

Následující text bude věnován charakteristikám dvou nejběžněji používaných metod z oblasti pólového i cirkulárního magnetování.

a) Pólové magnetování jhem:

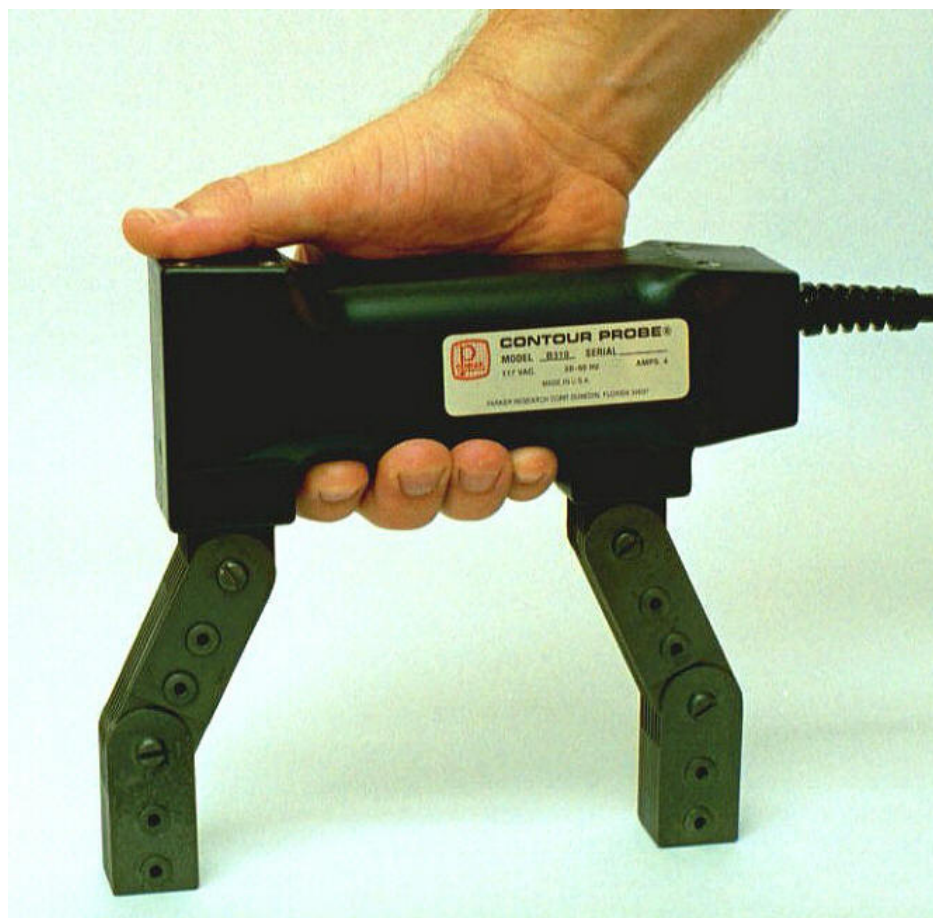
Jde o zkušební postup, při kterém je zkoušený předmět (nebo jeho část) umístěn mezi póly magnetovacího jha (viz Obr.2.1.3) a stává se součástí magnetického obvodu. Magnetické pole prochází od jednoho pólu k druhému, předmět je podélně magnetován, takže jsou zjistitelné příčné necelistvosti. Při magnetování jhem nedochází k poškození zkoušeného povrchu, neboť nevznikají opaly. Magnetovacím jhem může být permanentní magnet, nebo elektromagnet, napájený střídavým či stejnosměrným, případně impulzním proudem. Tento způsob magnetování se uplatňuje jak u ručních magnetů a elektromagnetů, tak u stacionárních přístrojů univerzálního i automatizovaného typu. [5]



Obr.2.1.3: Podélné magnetování elektromagnetickým jhem
1-zkoušený předmět, 2-elektromagnet [6]

Aby bylo možno vadu detekovat, je potřeba předmět zmagnetovat ideálně kolmo na směr vady, jak již bylo řečeno. Ve skutečnosti je při kolmém směru vady na magnetické pole indikace nejsilnější, ovšem pro detekci vady postačuje pouze sklon vady k magnetickému poli větší, než 45° . Proto je nezbytné pro platnou inspekci indukovat magnetické pole v předmětu nejméně ve dvou směrech. Magnetické jho je v tomto směru všestranný prostředek umožňující splnit tuto podmínku de facto u jakékoliv součásti. [3]

Elektromagnetické jho (viz Obr.2.1.4, 2.1.5) je v současnosti nejběžněji používaným typem, neboť naruší od permanentního magnetu vykazuje snazší manipulaci, vzhledem k možnosti vypnout přívod elektrického proudu a tím i magnetické pole a jednoduše sejmout jho ze zkoušené součásti bez překonávání síly magnetu. V základu se jedná o cívku navinutou na magneticky měkký ocelový trn. Může být napájeno střídavým proudem ze sítě, nebo stejnosměrným proudem z vlastní baterie. Generuje velmi silné magnetické pole v lokální oblasti pod póly, kterými se jho dotýká zkoušené součásti. [3], [5]



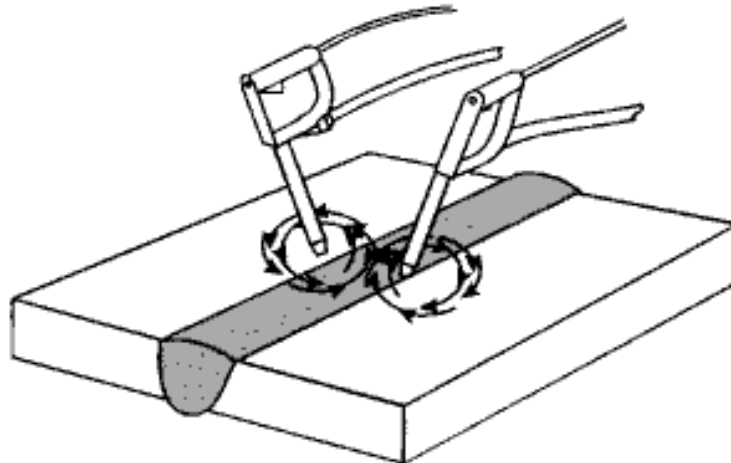
Obr.2.1.4: Elektromagnetické jho s kloubovými elektrodami [7]



Obr.2.1.5: Jho z permanentních magnetů. [7]

b) Cirkulární magnetování průchodem proudu:

Magnetování průchodem proudu (viz Obr.2.1.6, 2.1.7) je druh cirkulárního magnetování, při němž zkoušeným předmětem nebo jeho částí prochází elektrický proud přiváděný přiloženými elektrodami. Předmět je proudem příčně magnetován, takže jsou zjišťovány podélné necelistvosti, tj. probíhající ve směru průchodu proudu. Použitý proud může být stejnosměrný, střídavý, nebo impulsní. Jeho intenzita se pohybuje od několika stovek až do několika tisíc ampér, napětí je obvykle od 4 do 15 voltů. [5]



Obr.2.1.6: Schéma magnetování průchodem proudu pomocí elektrod [8]

Velkou výhodou tohoto způsobu je jednoduchost provedení, která je příčinou jeho značné obliby. Nevýhodou však je možnost vzniku opalů v místech dotyku elektrod se zkoušeným povrchem součástí. Proto dotykové plochy pro elektrody musí být dobře očištěny a musí zaručovat dobrý elektrický kontakt se zkoušenou součástí. Zdroje magnetovacího proudu jsou výkonné transformátory, od nichž se silovými kabely proud vede k elektrodám. Magnetování průchodem proudu se velmi rozšířilo v oblasti ručního zkoušení (tzv. zkoušečky svarů), ale je i jedním z hlavních magnetovacích způsobů u stacionárních strojů. [5]

Elektrody jsou běžně vyrobeny z mědi a mají izolované rukojeti z důvodů ochrany pracovníka. Jedna z elektrod je vybavena spínačem pro rychlé zapnutí a vypnutí magnetizačního proudu. Někdy jsou obě elektrody spojeny nevodičem pro ovládání jednou rukou. Tyto jsou obvykle označovány jako duální elektrody a používají se zejména pro kontrolu svarových spojů. Kvůli opalům není tato metoda povolena pro zkoušení součástí pro letectví a další citlivé aplikace. [3]

Intenzita magnetického pole na povrchu výrobku při zkoušce magnetickou práškovou metodou je ve většině případů dostatečující v rozmezí 3000 až 5000 A.m⁻¹. Z těchto hodnot se také v běžné praxi vychází při výpočtu intenzity proudu potřebného k dosažení této intenzity magnetického pole. Cirkulární magnetování ručními elektrodami se zjednodušeně vypočítá podle vztahu:

$$I = 5 \cdot L \quad (1)$$

I – intenzita proudu pro cirkulární magnetování [A]

L – vzdálenost mezi elektrodami [mm]

Tato konkrétní metoda je použita i při zkoušení odlitků sledovaných v této práci. Popis použité techniky a pracovního postupu bude uveden v kapitolách věnovaných sledovanému procesu.



Obr.2.1.7: Magnetování odlitku průchodem proudu pomocí elektrod [9]

2.2 Detekční suspenze

Klíčovou ingrediencí k provedení zkoušky je prášek magnetických částic, který formuje indikace v místě vady. Zprvu se používalo jemných pilin železa, nebo jeho oxidů. Jejich povrch byl obarven pro zvýraznění. Kov používaný pro tyto částice má vysokou magnetickou permeabilitu a nízkou retentivitu. Vysoká permeabilita je důležitá z důvodu vysoké citlivosti na malé magnetické rozptyly u malých vad. Nízká retentivita je důležitá z důvodu, aby částice nebyly silně zmagnetizovány, nepřilnuly k sobě a k povrchu zkoušené součásti. Jsou k dispozici v suché, nebo mokré formě. [3]

a) Suchý prášek:

Na povrch zkoušeného předmětu se naprašuje ručně, elektrostatickou pistolí, nebo sprejem. Při hromadném zkoušení se používá též speciální zařízení, zvané vířivý hrnec, který má dvojité průlinčité dno. Tímto dnem prochází stlačený vzduch, který magnetický detekční prášek nadlehčuje natolik, že je možné do něj lehce vkládat zkoušené výrobky, které se zvířeným práškem pokryjí. [3]

Magnetický prášek pro suchý způsob je podstatně hrubší, než pro mokry způsob, velikost jeho zrn se pohybuje od 40 do 400 μm . Používá se barevný (černý, šedý, červený) nebo fluorescentní prášek. Zkoušení se provádí v postupu:

- odstranění nečistot z povrchu zkoušené součásti (okuje, rez, tuky).
- určení vhodné intenzity magnetování pomocí měřky (klínová, Bertholdova).
- zmagnetování předmětu a současné poprášení.
- opatrné sfouknutí přebytečného prášku (stlačeným vzduchem).
- vyhodnocení vytvořených indikací.

Naprašování se používá u výrobků, jejichž povrch nesmí být z jakéhokoliv důvodu smáčen. Dále se uplatňuje přízkoušení velkých výkovků, nebo odlitků, kde se zjišťují rozměrnější vady a používá se též pro kontrolu za tepla. Při suchém zkušebním postupu je citlivost metody (vzhledem k velikosti zrna prášku) nižší a pro zjišťování jemných necelistvostí se tento způsob nehodí. Naopak u velkých necelistvostí je rozeznatelnost vad lepší než při mokrém způsobu pro výraznější kresbu indikace. Důvodem pro hrubší zrnitost suchého prášku je také prašnost příliš jemného prášku, jeho přilnavost ke zbytkům tuků a nečistot na povrchu součásti a zkreslení vlivem struktury povrchu. Suchý postup se používá poměrně zřídka. [3], [5]

b) Mokrý polévací způsob:

Na zkoušený povrch se magnetický prášek nanáší ve formě suspenze, a to poléváním, nástřikem ze sprejů, nebo pistolí, popřípadě se výrobek do suspenze ponořuje. Nátěr štětcem je primitivní technika, kterou nelze doporučit. Pro polévací postup se používá podstatně jemnějšího zrnění prášku než u suchého způsobu, takže je umožněna zjistitelnost i velmi jemných necelistvostí. Detekční suspenze pro polévací postup se připravuje v určité koncentraci, která je převážně uváděna výrobcem prášku v g.l^{-1} . Tato hodnota nemá být za normálních okolností ani snižována, ani zvyšována. Nízké koncentrace zaviňují nedostatečnou kresbu jemných necelistvostí. Vysoké koncentrace prášku v nosné kapalině způsobují zvýšené zbarvení nebo fluorescenci pozadí, což obojí vede ke zhoršení rozeznatelnosti vad. Převážná část výrobků se zkouší právě mokrym způsobem. Zkoušejí se jak obrobené výrobky, tak i polotovary s horší jakostí povrchu. Detekčními prostředky jsou olejové, nebo vodní suspenze barevného nebo fluorescentního magnetického prášku. Tyto suspenze se připravují buď smíšením prášku v suchém stavu, nebo ve formě pasty či koncentrátu s nosnou kapalinou. Nosnou kapalinou může být olej, petrolej, nebo voda s přísadami smáčedla, protikorozního přípravku a látky snižující pěnovost suspenze. V koncentrátech jsou již tyto přísady obsaženy. Velikost zrna magnetického prášku se pohybuje od 1 do 40 μm . Viskozita suspenze má být 1 až 3 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. Zkušební postup je následovný:

- dle stavu povrchu (suchý, mastný) se zvolí vhodná suspenze.

- dle barvy povrchu, nebo žádané citlivosti se zvolí barevná, či fluorescentní suspenze.
- povrch se zbaví nečistot, rzi a tuků.
- určí se vhodná intenzita a ověří se směr magnetování pomocí měrky (klínová, Bertholdova).
- předmět se současně magnetuje a polévá suspenzí, polévání se musí ukončit vždy dříve než magnetování a to o 3 až 5 s u olejových a 2 až 3 s u vodných suspenzí.
- vyhodnotí se indikace (je možno již před vyhodnocením předmět odmagnetovat - to se však nedoporučuje u předmětů s vysokou jakostí povrchu, kde by mohlo dojít k porušení indikací). [3], [5]

3 ZKOUŠKY ULTRAZVUKEM

Zkoušení ultrazvukem (dále jen UZ) je vůbec nejpoužívanější nedestruktivní zkušební metodou ve většině průmyslových aplikací. UZ může být použita jak pro detekci vad, tak k měření tloušťky, charakteristiky materiálů atd. Za ultrazvuk považujeme zvukovou frekvenci od 20kHz výše, tj. kmitočty nad hranicí slyšitelnosti lidského ucha. Moderními prostředky můžeme dnes vybudit zvukové frekvence až 1000MHz. Nejmenší délky UZ vln spadají do oboru vlnových délek viditelného světla. Proto mají UZ vlny také vlastnosti geometrické optiky: je možno je ohýbat, soustřeďovat do jednoho bodu a odrážet. K výrobě zdrojů UZ pro zkoušení materiálů se většinou používá piezoelektrických destiček. Zavedením střídavého napětí na jejich povrch, budou se tyto v rytmu daného kmitočtu stlačovat anebo roztahovat, tzn. měnič začne vysílat zvukové vlny. V opačném smyslu dopadem elastických vln na elektrody destiček vzniká na nich elektrické napětí. Typický UZ inspekční systém obsahuje několik funkčních jednotek, jako jsou přijímač, snímač a zobrazovací jednotka. Přijímač je elektronické zařízení, které vytváří vysokonapěťové elektrické impulsy. Snímač, který je řízený přijímačem, generuje vysokofrekvenční ultrazvukovou energii. Zvuková energie je zavedena a šířena skrz materiál ve formě vln. Pokud je v dráze vlny nějaká nesouvislost jako např. vada, část energie se od poškozeného povrchu odrazí zpět. Signál odražené vlny je snímačem transformován na elektrický signál, který se zobrazí na snímací jednotce. Při zkoušení materiálů UZ se využívá vlastností přímočarého šíření svazku UZ vln v pevných látkách bez jejich znatelného útlumu a téměř 100%-ního odrazu UZ vln na rozhraní materiál-vzduch. Tím je umožněno zjišťování trhlin a podobných vad v materiálu pomocí UZ. V porovnání s prozařovacími metodami pomocí X a gama záření mají UZ metody větší možnosti použití. [10], [11]

3.1 Zkušební metody

V UZ defektoskopii rozlišujeme několik způsobů zkoušení, nejběžnější jsou však 3 následující způsoby:

a) Impulzní metoda odrazová:

Tato metoda je obecně nejvíce používána. UZ impulz se zavede do zkoušeného materiálu a měří se doba, za kterou se vrátí odražený impuls od zadní stěny nebo vady. Velkou předností je možnost přesného určení místa vady z jedné přístupné strany. V souvislosti s touto metodou a v důsledku rozšiřování automatizace vystupuje stále více do popředí od r. 1959 imerzní způsob zkoušení. Při tom je zkoušený předmět částečně nebo úplně ponořen do vodní lázně. Takto získané spojení sondy s povrchem materiálu vrstvou vody dovoluje zjišťování malých vad těsně pod povrchem zkoušeného kusu. [11]

b) Průchodová metoda:

Pracuje se dvěma sondami (vysílač a přijímač), do zkoušeného kusu se zavádí spojitý svazek nebo impulsy UZ vln a měří se pokles amplitudy způsobený vadami. Hlavní nedostatek ve srovnání s odrazovou metodou spočívá ve špatném určení místa vady a těžkou uskutečnitelném konstantním souosém nastavení a vedení obou sond na zkoušeném materiálu. Jedním druhem průchodové metody je metoda zobrazování vad. Široký svazek UZ se zavede do materiálu a pomocí zvláštního zařízení umístěného na straně přijímače vznikne zobrazení určitého úseku materiálu, na kterém se vady projeví jako tmavá místa. [11]

c) Rezonanční metoda:

Při této se používá spojitého svazku UZ vln takové frekvence, která je v rezonanci s tloušťkou určitého etalonu (tj. na danou tloušťku materiálu připadá celý počet polovin vlnové délky). Pak se zjišťuje pouze tloušťka prozařovaného místa ve srovnání s tloušťkou etalonu. Z odchylek rezonančních kmitů získaných při zkoušení materiálu od kmitů získaných při zkoušení etalonu je možno usuzovat na výskyt zdvojení, trhlin a pod. [11]

3.2 Vlastnosti UZ vlnění

Důležitou roli v UZ defektoskopii hraje správná volba frekvence. Při zkoušení materiálů se používá frekvencí od stovek kHz až po cca 25MHz. Volba zkušební frekvence se řídí podle účelu zkoušky. UZ vlny nižších frekvencí mají v důsledku nepatrného útlumu při šíření zkoušeným materiálem daleký dosah (prozvučitelnost), jsou méně ovlivňovány hrubší strukturou materiálu a je možno jich použít také při zkoušení materiálu s drsným povrchem. Mají však velký úhel rozevření a proto nemohou bezpečně zjistit menší vady. Sondy o vyšší frekvenci vysílají svazek soustředěnější a mají větší rozlišovací schopnost, jsou však citlivé na drsnost povrchu a jsou nepříznivě ovlivňovány hrubou strukturou. Podstatou popsaných jevů je fakt, že změna frekvence při konstantní rychlosti zvuku vede ke změně vlnové délky. Je pravidlem, že pro detekci vady, musí být

tato větší, než polovina vlnové délky. UZ vlna je v základu charakterizována vlnovou délkou, frekvencí a rychlostí, kdy tyto veličiny jsou ve vzájemném poměru, dle vzorce, který v daném tvaru slouží k určení vlnové délky:

$$\lambda = c / f \quad (2)$$

λ – vlnová délka [mm]

c – rychlost šíření vlny [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$]

f – frekvence [Hz]

Rychlost šíření vln závisí na jejich charakteru z hlediska pohybu částic prostředí vzhledem ke směru jejich šíření. Rozeznáváme vlny:

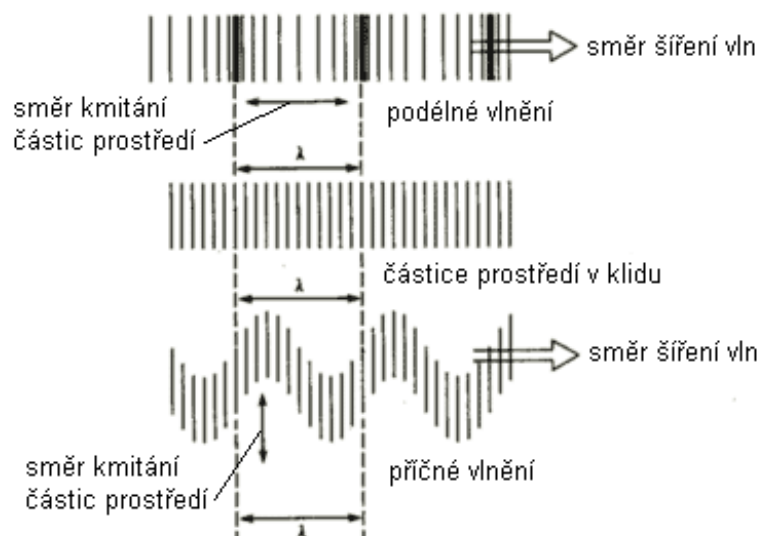
-Podélné, kdy částice prostředí kmitají přímočaře ve směru šíření vln, přičemž dochází k zhušťování a zředování částic prostředí (viz Obr.3.2.1).

-Příčné vlny způsobují kmitání částic prostředí kolmo na směr šíření vlny a to pouze v jednom směru v rovině kolmé na směr šíření-jde o vlny polarizované(viz Obr.3.2.1).

-Méně používané jsou vlny povrchové (Rayleighovy), deskové (asymetrické a symetrické) a vlny Loveovy.

V defektoskopii jsou nejpoužívanější dva prvně zmiňované druhy vln a to podélné a příčné, u kterých platí, že rychlost šíření vln je u příčných přibližně poloviční, než u podélných. Pro vlnění platí při průchodu z jednoho prostředí do druhého pravidla obdobná, jako u světla, tedy odraz a lom podle Snellova zákona, který platí i při přeměně podélných vln na příčné na rozhraní určitého prostředí.

Při zkoušení ocelí je rychlost šíření UZ vln podélných $5950 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, příčných $3260 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Běžně se používá frekvencí v řádu desetin až jednotek (maximálně desítek) MHz. Volba je závislá na charakteru zkoušeného předmětu-hrubosti zrna, tloušťce stěny, typu a velikosti hledaných vad. Volba frekvence následně ovlivňuje citlivost-schopnost odhalit malé vady, ta se zvyšuje s rostoucí frekvencí, a rozlišení-schopnost rozeznat dvě vady blízko u sebe, nebo blízko povrchu součásti.



Obr.3.2.1: Podélné a příčné kmitání UZ vln. [4]

Prochází-li UZ paprsek určitým materiálem, je UZ amplituda více nebo méně tlumena. Útlum je závislý na akustických vlastnostech daného prostředí. Příčinami jsou pohlcování, kdy se mechanická energie mění na tepelnou, rozptyl, odraz, lom a ohyb, kdy UZ vlna dopadá na jednotlivá rozhraní nehomogenní látky. Činitel útlumu je potom dán součtem dílčích útlumů a útlum zvukové amplitudy ve zjednodušené formě je dán rovnicí:

$$A_2 = A_1 \cdot e^{-\alpha \cdot (x_2 - x_1)} \quad (3)$$

$$\alpha = \alpha_1 + \alpha_2$$

A_2 – amplituda zvuku v místě x_2 [mm]

A_1 – amplituda zvuku v místě x_1 [mm]

α_1 – součinitel útlumu pohlcováním [dB.m⁻¹]

α_2 – součinitel útlumu rozptylem [dB.m⁻¹]

α – celkový součinitel útlumu mezi místy x_1 a x_2 [dB.m⁻¹]

$(x_2 - x_1)$ – vzdálenost míst x_1 a x_2 [mm]

Zvuk vystupuje z měniče nikoliv bodově, ale z většiny plochy piezoelektrického elementu. UZ zdroj o určitém průměru měniče vyzařuje vlny určité vlnové délky a úhlu rozevření svazku, který závisí na průměru měniče a vlnové délce, potažmo na rychlosti šíření vlny, frekvenci a průměru měniče, dle vztahu:

$$\sin \gamma = 1,08 \cdot \lambda / D = 1,08 \cdot c / (f \cdot D) \quad (4)$$

γ – úhel rozevření UZ svazku [°]

c – rychlost šíření vlny [m.s⁻¹]

f – frekvence [Hz]

D – průměr měniče [mm]

Toto ovšem platí teprve v určité vzdálenosti „ l_0 “ od UZ zdroje. Vzdálenost „ l_0 “ označujeme jako blízké pole, vzdálenosti větší než „ l_0 “ jako vzdálené pole (viz Obr.3.2.2). Blízké pole je z hlediska fyzikálního vzdálenost posledního maxima akustického tlaku na ose měřená od měniče, viz obr.... . Tlakové vlny se na konci blízkého pole slučují do relativně jednotného čela (viz Obr.3.2.3). Rozdíl mezi vzdáleným a blízkým polem je pro praxi důležitý z hlediska indikace vad. Výška poruchového echa od vady v blízkém poli je mnohem větší v důsledku interference, než u vady ve vzdáleném poli. Proto není možné bezpečně určovat vady v oblasti blízkého pole. Pro délku blízkého pole platí:

$$l_0 = (D^2 - \lambda^2) / (4 \cdot \lambda) \approx 0,25 \cdot D^2 \cdot f / c \quad (5)$$

l_0 – délka blízkého pole [mm]

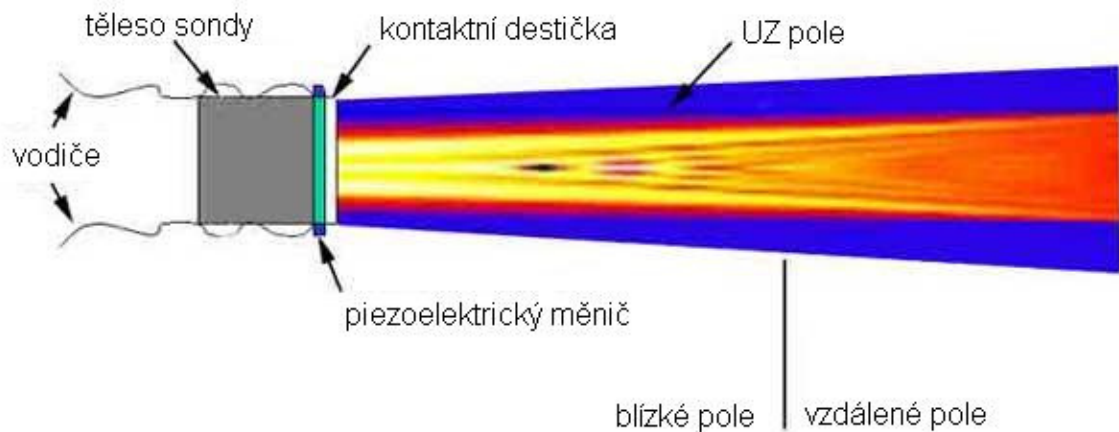
λ – vlnová délka [mm]

c – rychlost šíření vlny [m.s⁻¹]

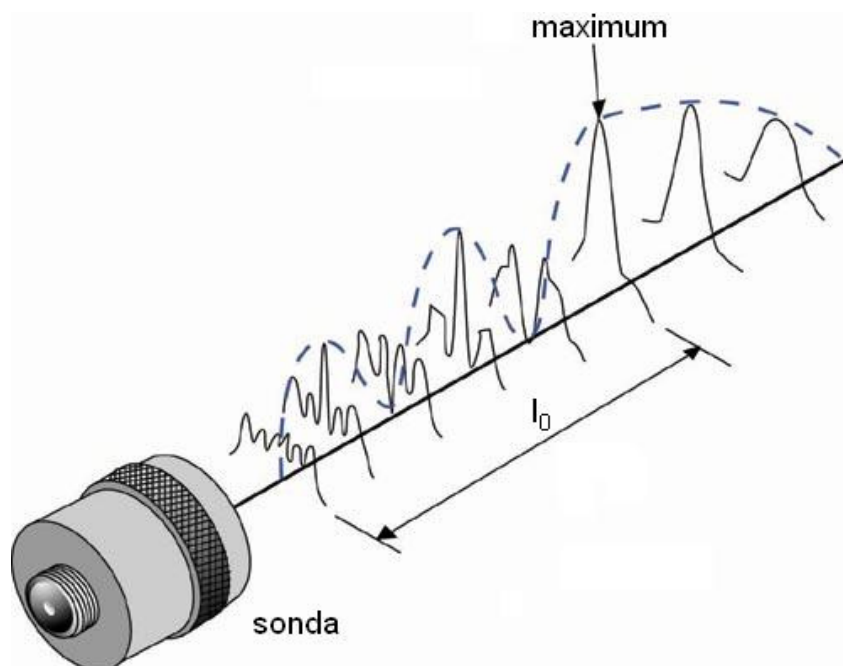
f – frekvence [Hz]

D – průměr měniče [mm]

[4], [5], [10], [11]



Obr.3.2.2: Zobrazení vyzařovaného UZ pole sondou. [4]



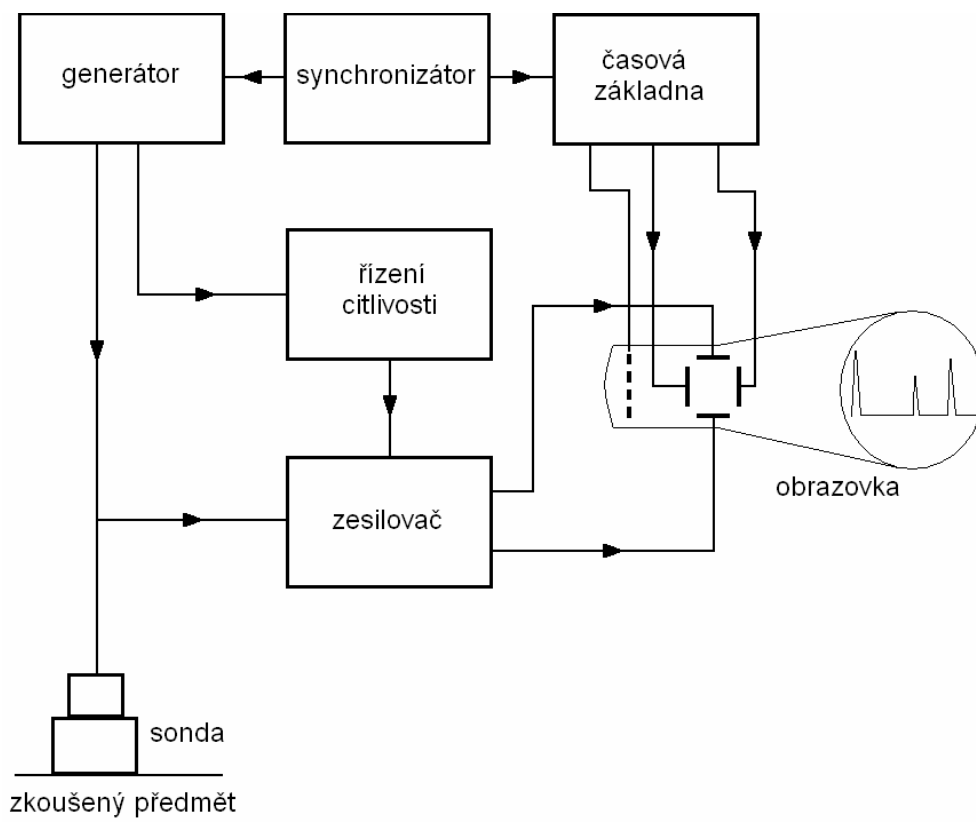
Obr.3.2.3.: Průběh tlakových vln v blízkém poli sondy. [4]

3.3 Zařízení pro UZ defektoskopii

a) Ultrazvukový přístroj:

Jedná se o zařízení, které slouží vysílání, přijímání a vyhodnocování signálu z měniče UZ sondy a řízení parametrů vlnění (viz Obr.3.3.1). Na UZ impulsovém defektoskopu jsou všechny údaje spojené s měřením času, který je při konstantní rychlosti šíření UZ vln úměrný dráze, zobrazeny na vodorovné ose obrazovky. Tato se nazývá časová základna. Na ní se odečítají délkové údaje, jako tloušťka zkoušeného materiálu v místě měření, nebo vzdálenost vady od povrchu, na němž je umístěna sonda. Má-li zkouška poskytovat

správné údaje, je třeba aby časová základna měla lineární průběh. Dle konkrétního zkušební postupu je třeba volit odpovídající ultrazvukový přístroj. Rozhodující údaje jsou jeho výkon a citlivost, frekvenční rozsah, rozsah a linearita časové základny, úroveň zesílení a linearita zesilovače, rozlišovací schopnost a případně způsob napájení, či rozměry a náročnost obsluhy. Díky rychlému vývoji elektroniky v posledních desetiletích, byly nahrazeny krystaly a elektronky polovodičovými prvky a ultrazvukový defektoskop tak došel zmenšení své velikosti, zdokonalení funkcí a zjednodušení obsluhy. Většina současných UZ přístrojů je vybavena LCD monitory místo dřívějších CRT, díky čemuž je přehlednost a ovladatelnost přístroje zaručena i za nepříznivých světelných podmínek v provozu. [5]



Obr.3.3.1: Základní schematické uspořádání UZ přístroje. [4]

b) Sonda:

UZ sondy slouží k přeměně elektrické energie na energii mechanickou a naopak. Umožňují zavádět akustickou energii do zkoušeného předmětu a naopak energii dopadající na sondu kvantitativně vyhodnotit. Aktivní částí měniče sondy je v principu kus polarizovaného materiálu s elektrodami připojenými k jeho protilehlým koncům (viz Obr.3.3.2). Při průchodu elektrického proudu se polarizované molekuly srovnají v souladu s procházejícím elektrickým polem, což způsobí změnu rozměrů materiálu. Permanentně polarizovaný materiál jako SiO_2 , či BaTiO_3 naopak produkuje elektrické pole, je-li materiál nucen mechanickým působením měnit svoje rozměry, jako důsledek piezoelektrického jevu. Aktivní část měniče je v dnešní době výhradně zhotovována z piezoelektrické keramiky, která může být díky jednoduché

výrobě zhotovena v mnoha tvarových provedeních. Od 60. let se stala nejpoužívanějším materiálem měniče zirkon-titanové kompozity. Tloušťka aktivní části měniče sondy se řídí požadovanou provozní frekvencí sondy a platí, že tloušťka odpovídá polovině vlnové délky, tedy čím vyšší požadovaná frekvence, tím tenčí musí být aktivní část měniče.

Sondy se dělí dle:

-typu:

přímá (viz Obr.3.3.3)

úhlová (viz Obr.3.3.4)

dvojitá

zvláštní

-tvaru měniče:

kruhový

půlkruhový

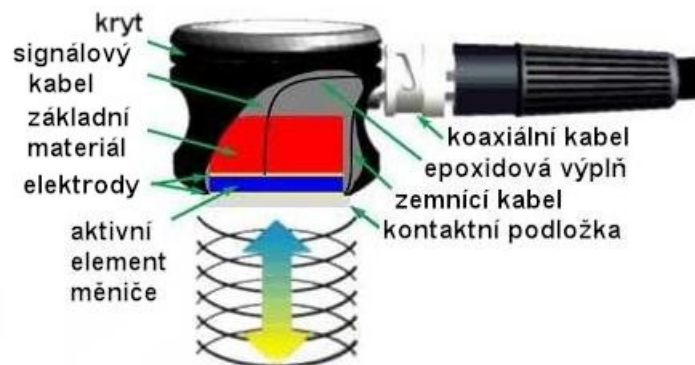
pravoúhelníkový

-druhu měniče:

magnetostrikční

piezoelektrické

[4], [5], [11]



Obr.3.3.2: Schematický řez UZ sondou. [4]



Obr.3.3.3: Přímé sondy fa Kraukrämer (GE). [12]



Obr.3.3.4: Úhlové sondy fa Kraukrämer (GE). [12]

3.4 Vyhodnocení UZ zkoušky

Vyhodnocení vad se zakládá na hodnocení ech na obrazovce UZ přístroje. Sonda je v kontaktu s povrchem zkoušené součásti, UZ signál vysílaný měničem sondy vyvolává vstupní echo a dále echo od každého dalšího odrazu od rozhraní rozdílných prostředí, tedy od protilehlého konce součásti, nebo od necelistvosti (vady) v součásti (viz Obr.3.4.1). Pro vlastní zkoušení je tedy třeba dle síly materiálu zkoušeného předmětu nastavit délkovou stupnici na přístroji, aby bylo zobrazeno vždy koncové echo od protilehlé strany součásti oproti vstupu svazku ze sondy. Jakékoliv další zobrazené echo mezi vstupním a koncovým echem, tedy takové, které neodpovídá vzdálenosti protilehlé stěny součásti, je dáno odrazem svazku od vady uvnitř součásti. V případě nejpoužívanější impulzové odrazové metody je možno určit polohu vady na základě přesného měření časového intervalu potřebného pro průchod ultrazvukového pulzu z měniče sondy skrze zkoušený materiál a jeho odraz od zadní stěny materiálu, nebo v případě výskytu necelistvosti, odraz od této a návrat do přijímače sondy. Měřený časový interval tedy odpovídá dvojnásobku vzdálenosti mezi sondou a odrazovou plochou. Přístrojem je registrována nejen doba průchodu, ale také úbytek akustické energie. Z těchto údajů lze tedy zjistit výskyt a polohu vady a usuzovat částečně její velikost a tvar. Tento interval se

obvykle pohybuje v řády mikrosekund, nebo méně. Na základě známé rychlosti šíření vlny a doby průchodu vlny materiálem je pak možno určit vzdálenost mezi polohou sondy a nečelivostí ve zkoušeném materiálu dle vztahu (impulzní metoda, přímá sonda):

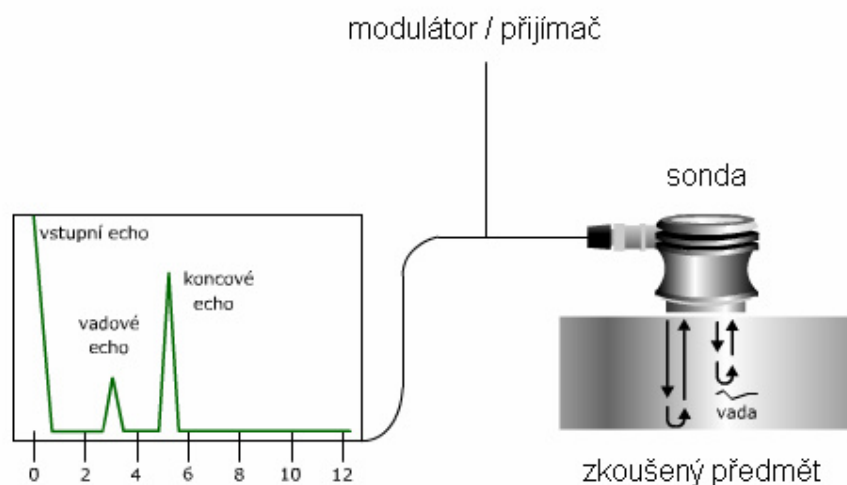
$$d = c \cdot t / 2 \quad (6)$$

d – vzdálenost mezi sondou a odrazovou plochou [mm]

c – rychlost šíření vlny [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]

t – doba průchodu UZ svazku [s]

[4], [5], [11]



Obr.3.4.1: Schema odrazu signálu při UZ zkoušce přímou sondou. [10]

V případě sondy úhlové (viz Obr.3.4.2), která je ozvláště vhodná pro zkoušení svárů, nebo jiných přímo nedostupných míst, je výpočet místa vady komplikovanější. Při zkoušení úhlovou sondou mohou nastat dva případy indikace vady:

a) dráha UZ vlny k vadě je menší, než polovina dráhy vlny k místu odrazu na protější stěně zkoušeného předmětu:

$$s < m / 2 = d / \cos \alpha \quad (7)$$

Pak je:

-hloubka vady:

$$t = s \cdot \cos \alpha \quad (8)$$

-vzdálenost místa vady od vstupu UZ svazku do materiálu:

$$r = s \cdot \sin \alpha = t \cdot \operatorname{tg} \alpha \quad (9)$$

b) dráha UZ vlny k vadě je větší, než polovina dráhy vlny k místu odrazu na protější stěně zkoušeného předmětu:

$$s > m / 2 = d / \cos \alpha \quad (10)$$

Pak je:

-hloubka vady:

$$t = (m - s) \cdot \cos \alpha = ((2 \cdot d / \cos \alpha) - s) \cdot \cos \alpha = 2 \cdot d - s \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

-vzdálenost místa vady od vstupu UZ svazku do materiálu:

$$r = 2 \cdot d \cdot \operatorname{tg} \alpha - ((2 \cdot d / \cos \alpha) - s) \cdot \sin \alpha = s \cdot \sin \alpha \quad (12)$$

α – úhel šíření UZ svazku v materiálu (úhel sondy) [°]

s – vzdálenost mezi vstupem UZ svazku a vadou [mm]

d – tloušťka zkoušeného předmětu [mm]

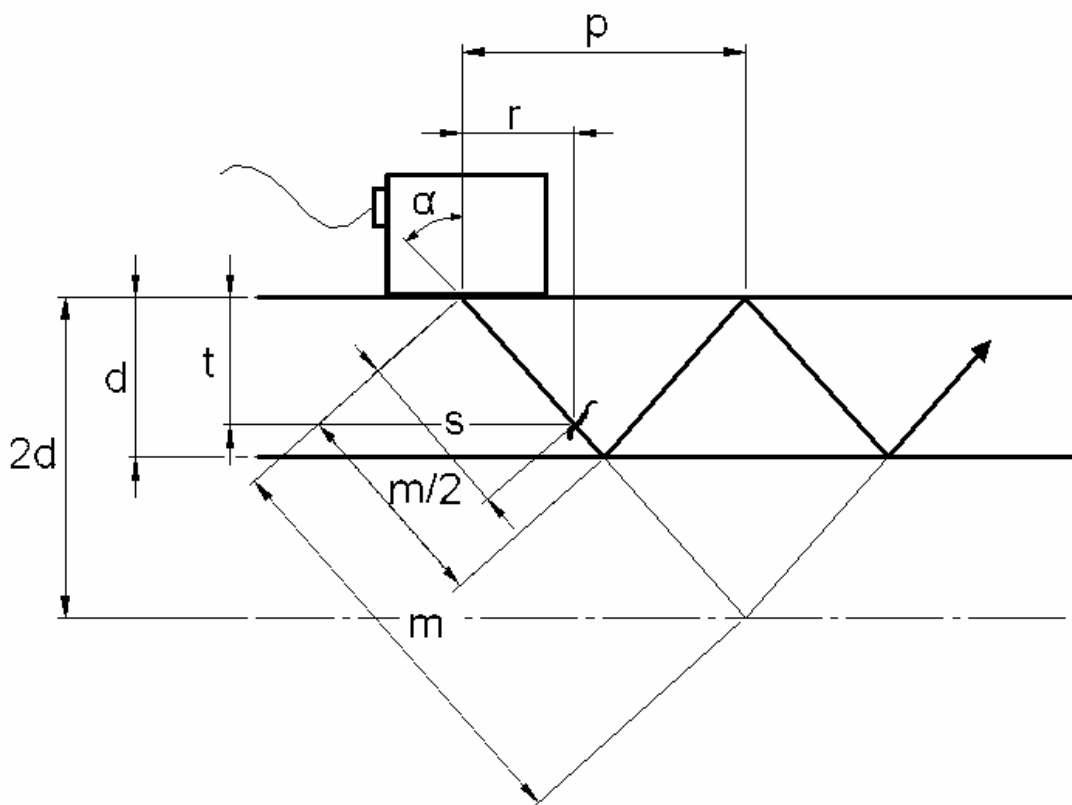
p – vzdálenost odražené UZ vlny na povrchu předmětu [mm]

m – vzdálenost mezi vstupem UZ svazku a místem odrazu na protější stěně [mm]

r – hloubka vady v od povrchu předmětu [mm]

t – povrchový průmět vzdálenosti vady od vstupu UZ svazku [mm]

[11]



Obr.3.4.2: Schema zkoušení odrazovou metodou s úhlovou sondou. [11]

Pro jednodušší určování místa vady při zkoušení úhlovou sondou existují tzv. lokalizační pravítka. Výhodné je použití úhlových sond pro zkoušení nedostupných míst, jako jsou průřezy závarové housenky, kterou přes křivý povrch svaru není dost dobře možné prozvučit přímou sondou, nebo

nepřístupné části tvarově komplikovaných výrobků, kde se s přímou sondou nelze dostat přímo nad zkoušené místo.

Pro správný přenos UZ svazku z měniče sondy do zkoušeného předmětu hraje významnou roli vazební prostředí aplikované mezi povrch součásti a sondy, které zajišťuje dobrý kontakt i přes nerovnosti povrchu součásti a zabraňuje tak výskytu vzduchu mezi sondou a zkoušeným předmětem. Vzduchová mezera snižuje úroveň přenosu ultrazvuku do předmětu a většina vlnění je odražena, místo aby prošla do zkoušeného předmětu. Prostředí, kterým se převádí UZ vlny z měniče sondy do zkoušeného předmětu se nazývá akustická vazba. Na její dokonalosti závisí, zda výsledky měření budou odpovídat skutečným hodnotám a jak budou reprodukovatelné. Přenosové vlastnosti prostředí závisí nejen na rychlosti šíření UZ v tomto prostředí a na jeho impedanci, ale také na poměru tloušťky vazební vrstvy a použité vlnové délky. Podle tohoto poměru rozeznáváme 3 druhy akustické vazby (viz Obr.3.4.3):

a) Kontaktní akustická vazba:

Tento druh akustické vazby umožňuje bezprostřední styk UZ sondy se zkoušeným předmětem. Jako vazební prostředí se většinou používá olej, vazelína, nebo různé druhy tuků a podobně. V některých případech i voda. Kontaktní akustická vazba se používá při ručním způsobu zkoušení. Při průchodové metodě se někdy UZ sondy přikládají na zkoušený výrobek přímo bez vazebního prostředí, které se nahrazuje určitým konstantním tlakem. Tohoto způsobu se používá při zkoušení za vyšších teplot.

b) Mezerová akustická vazba:

Při mezerové akustické vazbě je mezi měničem a zkoušeným předmětem malá mezera, která je vyplněna vazebním prostředím. Toto prostředí je obvykle voda nebo olej, který se plynule přivádí pod sondu tak, aby bylo zajištěno trvalé spojení a byla spolehlivě vyplněna mezera mezi sondou a materiálem. Důležité je, aby se netvořily bubliny, které zhoršují, nebo i zamezují průchod ultrazvuku. Protože tloušťka vazebního prostředí působí zároveň jako filtr, je nutné, aby byla v rezonanci s použitou vlnovou délkou. Tento způsob se používá převážně při mechanizovaném zkoušení.

c) Imerzní akustická vazba:

O imerzní vazbu jde tehdy, je-li vzdálenost mezi UZ sondou a zkoušeným předmětem větší, než je délka použité UZ vlny. Změny tloušťky vazebního prostředí způsobené drsností povrchu jsou zanedbatelné. Jako vazební prostředí se používá voda, olej, nebo jiná vhodná kapalina, přičemž je zkoušený předmět do vazební kapaliny ponořen. Aby bylo možno takovouto zkoušku vyhodnotit, musí tloušťka vazebního prostředí splňovat podmínku:

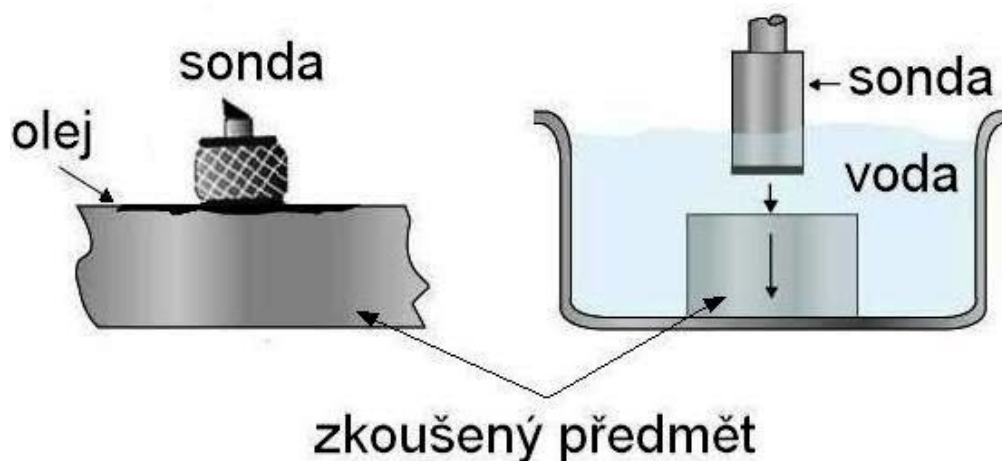
$$d_v \geq 1,1 \cdot d_m \cdot (c_v / c_m) \quad (13)$$

d_v – tloušťka vazební vrstvy [mm]

d_m – tloušťka zkoušeného materiálu [mm]

c_v – rychlost šíření UZ ve vazebním prostředí [$m \cdot s^{-1}$]

c_m – rychlost šíření UZ ve zkoušeném materiálu [$m \cdot s^{-1}$] [4], [5]



Obr.3.4.3: Porovnání uspořádání při kontaktní a imerzní akustické vazbě. [4]

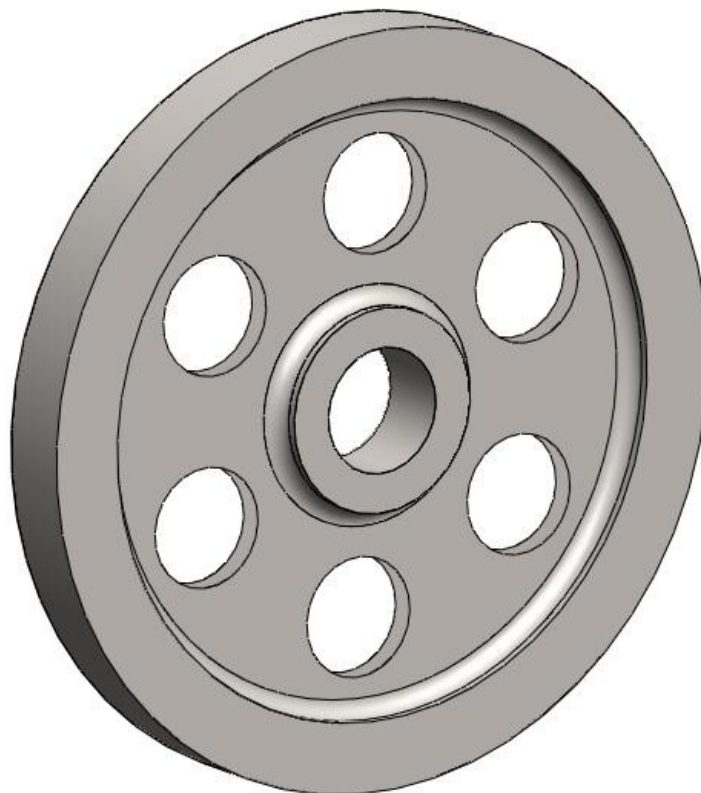
Nastavení přístroje pro zjišťování vad impulsovou metodou odrazovou je dáno řadou faktorů. Nejdůležitější je druh zkoušeného materiálu, podle nějž se odvíjí volba zkušební frekvence. Geometrický tvar zkoušeného předmětu pak ovlivňuje volbu použitých vln, tvar a velikost hledané vady zase druh a velikost sondy. Minimální velikost vady, kterou je ještě nutno zjistit ovlivňuje také frekvenci. Drsností povrchu se pak řídí volba akustické vazby.

Výška echa od vady závisí na velikosti vady, hloubce, orientaci vady a drsnosti povrchu součásti. V souvislosti s útlumem je důležité nastavení výšky ech od vady určitého rozměru (určité náhradní velikosti) v závislosti na hloubce vady, např. stanovení křivky na obrazovce, která dělí vady na ještě přípustné a nepřípustné. Ke kalibraci a nastavení náhradní velikosti vad, časové základny a dalších parametrů zkoušení se používá vyhodnocovacích diagramů a kontrolních měrek, či etalonů. [5], [11]

4 SLEDOVANÝ SLÉVÁRENSKÝ PROCES

Subjektem sledovaným v této práci je odlitek ozubeného kola (viz Obr.4.1). Odlitek je vyráběn na základě zakázky zadavatele od roku 2005 v průměrném počtu několika desítek kusů ročně. Slitina je diskutována v kapitole 4.1. Surová hmotnost odlitku je 1540 kg, hrubá hmotnost je 820 kg, při největším průměru kola 1262 mm a největší síle materiálu 130 mm. Zadavatel zakázky požaduje splnění vysokých hodnot mechanických vlastností materiálu: smluvní mez kluzu, tvrdost, tažnost a vrubovou houževnatost. Odlitek je tedy z tohoto důvodu po odlití upravován několika postupy tepelného zpracování. Stanovena byla kontrola jakosti ultrazvukem s hodnocením vad dle normy DIN 1690-2, stupeň III. Maximální přípustná velikost indikace je 8 mm. Jakékoliv zavařování vad není přípustné v oblasti vnějšího věnce, na kterém se obrábí ozubení. Dle požadavků je prováděna kontrola ultrazvukem, navíc této kontrole předchází i kontrola magnetickou metodou, zavedená podnikem z vlastní iniciativy. Výrobek je podroben v hrubém stavu magnetické zkoušce, po cyklu tepelného zpracování a hrubování pak znovu zkoušce magnetické a následně ultrazvukové. Během let výroby se nekonalo mnoho zásadních změn v technologii a přitom dochází občas k zjišťování opakujících se principiálně

totožných vad. Technologie výroby, zkušební postupy a charakteristika indikovaných vad bude rozebrána do podrobnosti v následujících kapitolách věnujících se konkrétnímu oblastem výrobního procesu.



Obr.4.1: 3D zobrazení odlévané součásti.

4.1 Odlévaná slitina

Odiltek byl prvně odléván dle požadavků zadavatele ze slitiny 35NCD6, dle francouzské normy AFNOR. V průběhu výroby trvající od roku 2005 se dle dohody se zákazníkem přešlo na materiál s téměř shodnými vlastnostmi G35CrNiMo6-6, dle normy DIN EN a z tohoto je odléván i nadále.

a) Charakteristika:

Jedná se o nízkolegovanou ocel na odlitky, vhodnou pro následné tepelné zpracování. Označení dle francouzské normy AFNOR je 35NCD6, jiné normy uvádí stejnou nebo parametry obdobnou ocel jako:

DIN EN: 1.6579 (G35CrNiMo6-6) {do roku 2005 značeno: 1.6582 (34CrNiMo6)}
AISI: 4340

Ocel je určena pro všeobecné použití, uplatnění nachází především pro výrobu součástí strojů podléhajících zvýšenému namáhání. Provoz za teplot do 300°C. Výroba ozubených kol, částí turbín, ventilů, elektrických strojů a další.

b) Fyzikální vlastnosti:

Lineární tepelná roztažnost: 11,5 [$10^{-6}/K$]

Měrná tepelná kapacita: 461 [J/(kg.K)]

Tepelná vodivost: 33,7 [W/(m.K)]

Elektrický odpor: 0,309 [mW.m]

Měrná hmotnost: 7,85 [g/cm³]

c) Chemické složení:

Prvek	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	V	Cu
Jednotka	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Minimum	0,32	0	0,6	0	0	1,4	1,5	0,15	0	0
Maximum	0,37	0,6	1	0,02	0,015	1,7	1,7	0,35	0,05	0,3

d) Mechanické vlastnosti:

Modul pružnosti: 2,12.10⁵ [MPa]

-normalizovaný stav: -kalený a popuštěný stav:

Rp0,2: 550 [MPa] 800 [MPa]

Rm: 800-900 [MPa] 900-1100 [MPa]

Tvrdość: 250 [HB] 300 [HB]

Tažnost (A): 12 [%] 10 [%]

Kontrakce (Z): 55 [%] 40 [%]

KV: 31 [J] 45 [J]

 σ_{c10}^8 : - 585 [MPa]

e) Technologické vlastnosti:

Svařitelnost: zaručená

Teplota přehřevu: 200-350 [°C]

Teplota interpass: max 400 [°C]

Tvařitelnost: při teplotách 850-1050 [°C]

Obrobitelnost: dobrá ve stavu žháný na měkko

Tepelné zpracování (viz Obr.4.1.1):

Normalizační žhání: 860-920 [°C], vzduch

Žhání na měkko: 650-700 [°C], chlazení v peci

Kalení: 910-930 [°C], chlazení voda/olej

Popouštění: 540-630 [°C], chlazení na vzduchu

Dosažitelná povrchová tvrdość po kalení: 52-56 HRC

Struktura po kalení: jemný martenzit

Velikost zrna při austenitizaci: 30-200 [μm]

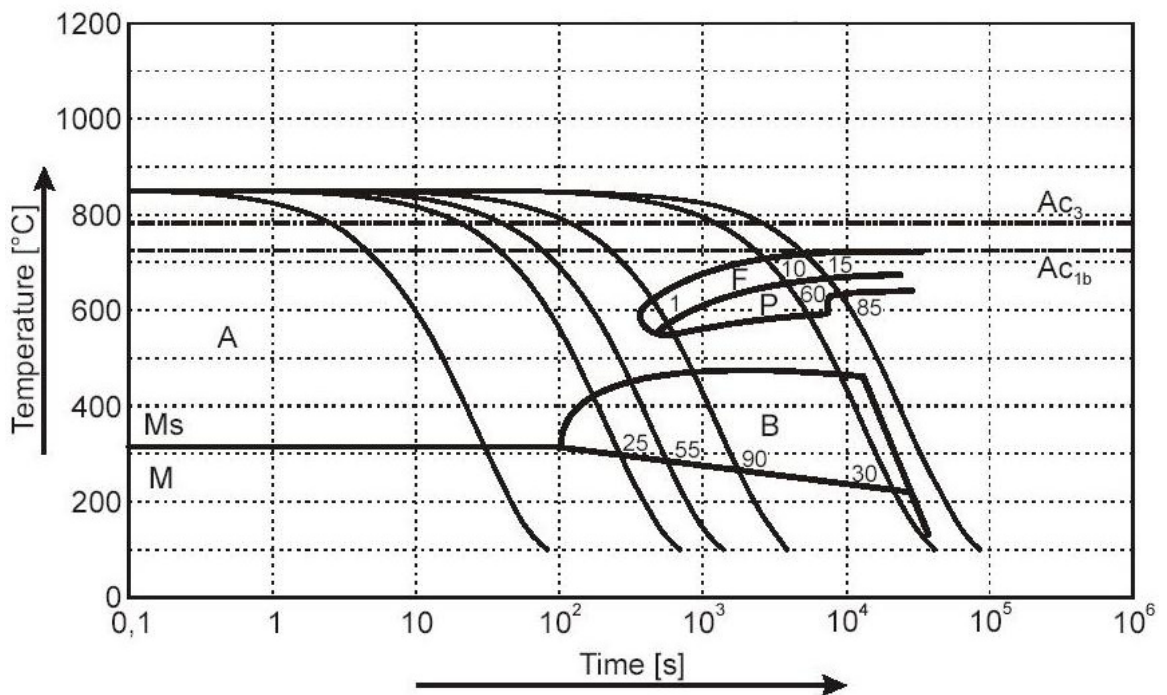
Licí teplota: 1500-1520 [°C]

Nálitkování: doporučené, smršťení +/-2%

Zabíhavost: dobrá

Technologie lití: gravitační

Formovací směsi: netrvalé formy, všechny pojivové systémy

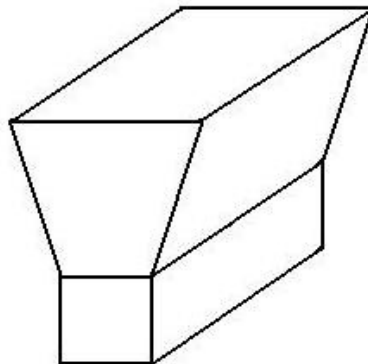


Obr.4.1.1: ARA diagram pro starší variantu značení DIN 1.6582. [14]

f) Zkoušení:

Destruktivní:

Typickou zkouškou pro tento materiál je zkouška vrubové houževnatosti za běžných, nebo snížených teplot, a zkouška pevnosti v tahu, případně i únavové zkoušky. Při výrobě odlitků se zkušební tělesa získávají vyříznutím z přilitých klínů. Tyto klíny se řídí normou ČSN EN 1559-1, ta však neudává závazný tvar a rozměr a tyto tedy vycházejí z požadavků zákazníka a řídí se většinou jmenovitou silou stěny odlitku. Obvyklý tvar klínu viz obrázek (Obr.4.1.2). Vzorky se vyřezávají ze spodní části čtvercového průřezu, zatímco vrchní klínová část je určena jen pro dosazování.



Obr.4.1.2: Tvar přilitého zkušebního klínu pro ocelové odlitky.

Nedestruktivní:

U odlitků z 35NCD6 se běžně užívá kapilárních zkoušek, magnetických (pólových i cirkulárních), ultrazvukových a prozařovacích (rentgen i radioizotopy).

Vady:

Typickým představitelem hlavně u větších odlitků jsou trhliny za tepla. S náročností následného tepelného zpracování jejich riziko roste.

g) Příklady použití:

Typickým představitelem odlitku z této oceli jsou klikové hřídele pro velké stroje (lodě, lokomotivy,...), tělesa ventilů, ozubená kola, excentrické hřídele, součásti pro elektrárny (i jaderné) a energetiku a těžký průmysl všeobecně.
[13], [14]

4.2 Technologie lití

Součást je odlévána do netrvalé formy gravitačním litím. Formy jsou zhotovovány na modelové desky ze samotuhnoucí formovací směsi, (viz příloha: Obr.4.2.1-4.2.4). Tato směs je tvořena pojivovým systémem na bázi alkalické fenolické pryskyřice vytvrzované estery, nesoucím obchodní název AlpHaset TPA 70, dodávaným společností Sandteam společně s křemičitým ostřivem. Modelová směs obsahuje dle aktuálních teplotních podmínek v době lití (léto / zima) 1,05 až 1,2% pryskyřice a tvrdidlo v poměru 20% k obsahu pryskyřice. Formovací směs je každodenně kontrolována na pevnost, přičemž její hodnoty se pohybují v létě od 100 do 150 N a v zimě 70 až 120 N pro modelovou směs a 50 až 100 N pro směs výplňovou (zkouška prováděna na vzorku o průřezu 24,5 x 24,5 mm). Tepelně více namáhané oblasti jsou zasypávány chromitovou směsí, jedná se především o rádiusové přechody vnitřního a vnějšího náboje. Formování se provádí do dvou rámu 1500 x 1500 / 300. Všechny otvory výrobku jsou předlévané, přičemž pouze otvor ve vnitřním náboji je formován jádrem, zatímco ostatní otvory odlitku jsou modelovány přímo do formy modelovým zařízením. Jádro pro otvor vnitřního náboje je zhotoveno ze stejné modelové směsi, jako je forma. Hotová forma je pak ošetřena zirkonovým nátěrem na lihové bázi. Odlévá se po nejméně 24 hodinách od zhotovení formy. Vtoková soustava je řešena spodním plněním do dvou míst vnitřního náboje a tekutý kov je rozváděn samotovými trubkami o průměru 80 mm pro vtokový kůl a 60 mm pro rozváděcí kanály. Z důvodů následných mechanických zkoušek jsou k tělesu součásti přility 3 klíny pro zhotovení zkušebních vzorků (viz příloha: Obr.4.2.5). Odlitek je nálitkován ve vršku formy šesti oválnými izolovanými nálitky po obvodu vnějšího náboje a jedním komplexním komolým nálitkem pro vnitřní náboj (viz příloha: Obr.4.2.4). Nálitky jsou izolované, opatřené při lití exozásypem Kvartex. Licí teplota se pohybuje od 1500 do 1520 °C a lití se děje pánví se spodní výpustí.

Vzhledem k požadavkům na vysoké hodnoty mechanických vlastností součásti je odlitek následně tepelně zpracován. Cyklus tepelného zpracování sestává z žíhání na měkko, po němž teprve následuje odstranění nálitků a

vtokové soustavy upalováním. Poté je součást normalizačně vyžihána při teplotě 905 - 935 °C po dobu 4 hodin s chladnutím na vzduch, následně je ohrubována, zakalena při teplotě 920 - 940 °C po dobu 4 hodin s chlazením do oleje a na závěr je popuštěna při 610 °C po dobu 5 hodin s chladnutím na vzduchu. Kalení se u prvních sérií provádělo do vody, což mělo za následek vysoké mechanické hodnoty, ovšem také vznik prasklin a proto se přešlo k olejové kalící lázni. Tepelné zpracování bylo prováděno kompletně v rámci podniku až do nedávna, kdy se kalení začalo provádět v kooperaci a kalící teplota se snížila na spodní hranici 920 °C. Důvodem pro tento složitý cyklus tepelného zpracování jsou následující požadavky na mechanické vlastnosti dané zadavatelem:

-vrubová houževnatost: $KCV \geq 35 \text{ J/cm}^2$ {při -20 °C}

-smluvní mez kluzu: $R_{p0,2} \geq 750 \text{ MPa}$

-mez pevnosti: $R_m = 850 - 1000 \text{ MPa}$

-tvrdost: 250 – 300 HB

-tažnost: $A \geq 12 \%$

Po cyklu tepelného zpracování je prováděna apretura tryskáním a dále je prováděno přímo v podniku základní hrubování odlitku na rozměry dané výkresem (viz příloha: Obr.4.2.7). Mechanické zkoušky jsou prováděny na vzorcích vyřezaných ze spodní části přilitého klínu o čtvercovém průřezu 50 x 50 mm a délce 180 mm.

4.3 Aplikace NDT

Dle požadavků zadavatele je součást kontrolována ultrazvukovou impulzní odrazovou metodou v oblastech vnějšího a vnitřního náboje (viz příloha: Obr.4.2.7). Součást je taktéž zkoušena cirkulární magnetickou metodou průchodem proudu z vlastní iniciativy podniku, přičemž tato zkouška předchází ultrazvukové kontrole.

4.3.1 Použitá technika

a) Zkouška cirkulárním magnetováním průchodem proudu:

Použit byl přístroj Tiede GWH 1500 Ferrotest s ručními elektrodami Tiede DIX PM 50. Jako detekční suspenze byl použit fluorescenční přípravek Pfinder Apelux 1018 s obsahem antikoročních přísad a smáčedel a s velikostí zrna od 3 do 8 µm. Vyhodnocení zkoušky probíhalo pod UV lampou. [15]

b) UZ zkouška impulzní-odrazová:

Použit byl digitální ultrazvukový defektoskop Krautkrämer (dnes GE Inspection Technologies) USM 35X (viz Obr.4.3.3.1). Sonda byla použita Krautkrämer B2S, přímá, o jmenovité frekvenci 2MHz s průměrem měniče 24mm. Akustická vazba byla zajištěna plastickým mazivem Madoil LV 2-3. Kalibrace zařízení-nastavení časové základny bylo prováděno na stupňovité měrce vlastní provenience. (viz příloha: Obr.4.2.8). [12], [16]



Obr.4.3.1.1: Ultrazvukový defektoskop Krautkrämer USM 35. [15]

4.3.2 Postup

Součást je zkoušena nejprve metodou magnetickou práškovou a následně ultrazvukem. Popsán bude způsob zkoušení před expedicí odlitku, tedy ohrubované a tepelně zpracovaná součást připravená k přejímce.

Při zkoušení metodou magnetickou práškovou se součást postříkuje detekční suspenzí Apelux a zároveň se provádí magnetování příložitými elektrodami. Z důvodů použití fluorescenční suspenze probíhá zkouška v temné místnosti, aby byla viditelnost indikací dostatečně kontrastní. Pro zjištění indikací ve všech možných směrech se přikládají elektrody na zkoušené místo několikrát v křížících se průsečnicích dotkových bodů elektrod. Zkouší se oblasti přechodů vnitřního náboje a vnějšího náboje ke dnu součásti (viz příloha: Obr.4.2.7). Prvně se ukončí postřík a krátce poté, řádově ve vteřinách, i magnetování. Následuje nasvícení zkoušeného místa UV lampou a vyhodnocení indikací. Tyto jsou zobrazeny jako výrazněji svítící žlutá místa, způsobená nahromaděním částic ze suspenze v místě necelistvosti. Vzhledem k hrubé struktuře povrchu odlitku je třeba rozeznávat indikace od necelistvostí struktury a od povrchových rýh.

Zkouška ultrazvukem začíná kalibrací defektoskopu s danou sondou na stupňovitém etalonu. Nastaví se vhodné parametry zkoušky (rozsah dle maximální zkoušené síly materiálu, zesílení dle struktury zkoušeného povrchu, křivka velikosti náhradní vady dle povolené velikosti indikace). Následně je součást potřena plastickým mazivem na zkoušených oblastech a to na obou stranách odlitku na čelních plochách vnitřního a vnějšího náboje. UZ sice umožňuje projít bezpečně silnější stěnou oceli, než je maximální tloušťka

zkoušených oblastí, ovšem kvůli blízkému poli a úhlu rozevření sondy se zkouší součást z obou stran, aby nemohla uniknout vada skrytá těsně pod povrchem odlitku. Zkouší se tažením sondy po povrchu odlitku s dostatečným přtlakem, aby byla zajištěna dobrá akustická vazba, a současným sledováním obrazovky defektoskopu. Sonda je tažena „cik-cak“ postupně po obvodu náboje tak, aby byla pokryta celá plocha čela náboje (viz příloha: Obr.4.3.2.1-4.3.2.4). Vyhodnocení probíhá na základě sledování vstupního echa, koncového echa od protějšího čela náboje a případného echa mezi dvěma prvně zmíněnými, nebo vymizení koncového echa vlivem indikace větší, než svazek ultrazvuku. Dle výšky echa případné indikace se rozhodne o přípustnosti velikosti této indikace. Při tažení sondy je třeba nezaměnit indikaci případné vady od přechodu náboje ke dnu součásti. Je-li indikace zachycena, zaznamená se její rozsah křídou na odlitek, aby bylo možné vadu lokalizovat následně bez ultrazvuku. Zkouška ultrazvukem slouží z hlediska konkrétních vyskytujících se vad spíše pro zjištění rozsahu (hloubky) indikací, neboť vyskytující se povrchové necelistvosti jsou dříve odhaleny magnetickou zkouškou.

4.3.3 Detekované vady

Od zahájení výroby daného odlitku se vyskytují pravidelně stále stejné typy indikací s výjimkou počátku výroby, kdy se přecházelo z vazné formovací směsi na samotuhnoucí, přičemž při původní vazné směsi se přechodně vyskytovaly zálupy. Od zavedení samotuhnoucí směsi jsou na odlitku lokalizovány pravidelně totožné indikace ve tvaru úzkých a dlouhých necelistvostí. Tyto jsou objevovány někdy již před kalením a popuštěním odlitku, někdy až při druhé zkoušce po zmíněném tepelném zpracování. Vždy se však jedná o indikace se stejnými tvarovými charakteristikami nasvědčující tomu, že se jedná o vady typu porušení souvislosti, trhlina/prasklina. Tyto jsou někdy vystupující až na povrch a odhalené již magnetickou zkouškou, někdy podpovrchové a odhalené až ultrazvukem.

5 KONTROLA A ŘÍZENÍ JAKOSTI

Základním hnacím momentem pro řízení jakosti je potřeba vyrábět odlitky se snižujícími se náklady a tedy postupně omezovat výskyt vad na minimum s přihlédnutím k ekonomické náročnosti zamezení vzniku jednotlivých druhů vad. Pro úspěšné řízení jakosti je potřeba řídit se základní hierarchií úkonů:

- zjištění vady
- identifikace druhu vady
- určení příčiny vzniku vady
- stanovení možných opatření pro zamezení vzniku vady

První krok, tedy zjištění indikace případné vady již byl rozebrán v předchozí kapitole.

5.1 Identifikace vad

Slévárenská technologie s sebou nese vzhledem ke své složitosti předpoklady ke vzniku mnoha různých vad. Charakter vady závisí komplexně na dané slévárenské technologii. V základu lze shrnout vlivy ke vzniku vad na vlivy formovací směsi, tekutého kovu, konstrukce a velikosti odlitku, a podmínek lití.

Správná identifikace vady je hlavní problém slevačů po celou dobu historie slévárenství. Umět řídit jakost ve slévárenství znamená umět určit neshody (vady) a znát postupy, jak těmto neshodám předcházet. Diagnostika vady je klíčem ke snížení nákladů ve slévárně. Ve výrobě se mohou vyskytovat vady jednoduché, jejichž lokalizace je možná běžnou vizuální kontrolou a u těchto lze také obvykle lehce určit typ vady a příčinu jejího vzniku. Běžně se však vyskytují vady, jejich odhalení a správné zařazení není tak jednoduché. Podrobná klasifikace vad, která vznikla pod patronací CIATF, nebo jako český návrh, si kladla za cíl rozčlenit vady odlitků tak, aby se dala po identifikaci vady přímo a jednoznačně určit její příčina. Lze to tak učinit v případě vad tvaru, rozměrů a hmotnosti, jako je např. nedolití, špatná oprava formy, přetryskaný odlitek, špatný model, nebo u povrchových vad prasklé jádro, prasklá forma, nedokonalý svar aj. Většina vad však má mnoho příčin – některé, jako např. zadrobeniny, sekundární struskovitost, povrchové trhliny aj., mohou mít desítky příčin. Stejně tak je komplikovanější jejich správná identifikace, respektive jednoznačné rozhodnutí, zda se jedná o tu, či onu vadu, mají-li dvě různé vady obdobné průvodní jevy. Identifikace vady je složitý intelektuální výkon, který vyžaduje kromě kvalifikace též zkušenosti a intuici. Aby kontrolor, metalurg nebo jiný slévárenský technik byl dobrým diagnostikem vad, je třeba, aby používal vhodnou měřicí a laboratorní techniku, měl dobrou paměť, schopnost kritického myšlení, analýzy a syntézy vztahů mezi různými činiteli a dokázal být objektivní. K chybám v identifikaci vad odlitků dochází z důvodu neznalosti, nesprávného úsudku a nedostatku informací. V případě nejednoznačných vad je tedy třeba použít další vhodné nástroje k jejich identifikaci, jako jsou například zkoušky chemického složení, fázového složení, světelná a elektronová mikroskopie a další. Tyto metody jsou ekonomicky náročné, narozdíl od vizuální kontroly a sami o sobě k identifikaci vady nepřispějí, pokud kontrolor neví, co hledat. Důležitý je pro to také sběr komplexních informací o celkovém průběhu výrobní technologie, z nichž se následně dá usuzovat co se pod danou indikací skrývá za vadu a jaká je příčina jejího vzniku. Ze znalostí příčin vady a z určených souvislostí mezi podmínkami jejich vzniku a konkrétními výrobními podmínkami se následně dochází k vypracování návrhu na opatření a k realizaci těchto návrhů ve výrobě. Uvedený postup je tím účinnější, čím dříve se podaří vadu zachytit, nejlépe ještě na surovém neotryskaném odlitku, tím spolehlivěji a s méně prostředky se podaří vadu identifikovat. Uvedený postup někdy nestačí k určení příčin vady a pak se využívají statistické metody, s jejichž pomocí můžeme srovnávat soubory informací o odlitcích s vadami a bez vad, sledovat časové řady dat, jejich trendy apod. V současné době je trend vytvářet za tímto účelem programy s expertními systémy, které pomáhají řešit kontrolorům, technologům a metalurgům problematiku diagnostiky vad odlitků. V případě sledovaného slévárenského procesu se však jedná o ne zcela konstatní sériovou výrobu a sériovost není tak vysoká (jak již bylo zmíněno, jedná se o průměrně desítky

kusů ročně a vyráběné nahodile během roku dle požadavků zadavatele), aby se dalo uplatňovat efektivně složitých statistických postupů. [17]

Indikace zjišťované na sledovaném odlitku svým charakterem odpovídají vadám kategorie porušení souvislosti, trhliny a praskliny. Pro správné zařazení byla u jednoho odlitků s touto indikací provedena zkouška v metalografické laboratoři (viz příloha: Obr.5.1.1-5.1.5). Šetření byly podrobeny dva segmenty „A“ a „B“ s indikacemi, vyříznuté z odlitku. Hlavní šetření proběhlo se segmentem „A“, zatímco segment „B“ sloužil jako referenční, zda typ necelistvosti je totožný. Z obou segmentů byl vyříznut vzorek z míst, které protínala necelistvost. Na těchto vzorcích byl běžnými metodami (broušením za mokra, leštěním diamantovými pastami) připraven metalografický vzorek. Takto připravený vzorek byl podroben pozorování na metalografickém mikroskopu Neophot 32 a dokumentace byla provedena digitálním fotoaparátem Sony. Po vyhodnocení vměstků byl vzorek leptán 3% roztokem Nitalu. Výsledky metalurgického šetření prokázaly:

-struktura: jemný martenzit (v celém segmentu)

-vměstky: vyšší podíl vměstků nezjištěn

-charakter necelistvosti:

a) Kraj necelistvosti: slévárenská vada, zřejmě ředina

b) První 1/3 necelistvosti: zvrásněný povrch necelistvosti jakožto charakteristický rys, který vzniká při tuhnutí taveniny a tvorbě primárního austenitického zrna.

c) Druhé 2/3 necelistvosti: matný lom, zřejmě vzniklý při následném kalení, struktura odpovídá tomuto TZ.

Fotodokumentace metalografického šetření i s popisem snímků je umístěna v příloze (viz Obr.5.1.1-5.1.5). [18]

Na základě metalografického šetření bylo rozhodnuto, že iniciace vady je trhlina, tedy necelistvost vzniká za vysokých teplot. U některých neshodných odlitků se jednalo o vady pouze typu trhlina. U jiných se vzhledem k době výskytu jednalo spíše o vady typu prasklina, či obvykleji kombinace obou variant, což bylo následkem tepelného zpracování odlitku. Primárně však jde o necelistvost typu trhlina, která se následně může rozšiřovat ve formě praskliny. Povrchová trhlina se tvoří již v pásmu tuhnutí a končí v úzké teplotní oblasti pod solidem. Probíhá po hranicích primárních zrn (označována je také jako primární, nebo krystalizační trhlina), proto je křivolaká, s hrubým dendritickým lomem a zpravidla zoxidovaným povrchem s náběhovými barvami od přístupu vzduchu. Její průběh je kolmý na směr působícího napětí. Protože indikace byla iniciována ve formě povrchové trhliny a následně (obvykle po tepelném zpracování) došlo k rozšíření ve formě praskliny, budou v následujících kapitolách diskutovány možné příčiny vzniku trhlin v odlitcích a zhodnoceny významnosti jednotlivých možných příčin. [19]

5.2 Identifikace příčin

[19], [20] Trhliny a praskliny jsou slévárenské vady, které mají různorodé pole vzniku a často se jedná o komplexní důvody, nikoliv jedinou konkrétní příčinu a tedy jednoznačnou možnost, jak zamezit jejich vzniku.

Všeobecně lze rozdělit faktory způsobující vznik povrchových trhlin do několika kategorií. Stejně tak je tomu i v případě prasklin, přičemž vlivy obou vad se často prolínají, tyto vlivy budou následně diskutovány.

a) Smršťování odlitku a jeho brždění, smršťovací napětí:

Smršťování a roztahování je fyzikální vlastností kovů a slitin. U odlitků se smršťování v plném rozsahu (od tekuté fáze až do vychladnutí ztuhlého odlitku) projevuje při tuhnutí a chladnutí ve formě a společně s roztahováním také při tepelném zpracování odlitků. Tyto děje vyvolávají v odlitku objemové a lineární změny. Objemové smrštění, označované také jako stahování vytváří v odlitku soustředěné staženiny, řediny, mikropórovitost. Výjimku tvoří zvláštní kovy a jejich slitiny, které při tuhnutí zvětšují svůj objem (antimon, vizmu, křemík,...). Lineární smrštění při chladnutí odlitku je příčinou zmenšení rozměrů odlitku vůči modelu – formě. Jelikož je skutečná velikost smrštění odlitků závislá na řadě činitelů, především na konstrukci odlitku a mechanickém odporu jader nebo formy, vyjádřenému jejich pevností – tuhostí, proto lineární smrštění ovlivňuje rozměrovou přesnost odlitku a hodnotu smršťovacího napětí v odlitku a tím i možnost vzniku povrchových trhlin. Vznikem teplotních gradientů v odlitku a tím nerovnoměrného a časově rozdílného chladnutí (či průběhu fázových přeměn) vnějších a vnitřních vrstev stěny nebo tenkých a masivních částí odlitku se vyvíjejí v odlitku vnitřní napětí tepelná a fázová. Tím jsou opět dány možnosti ke vzniku vnitřních trhlin či prasklin odlitku. Celkový průběh smrštění se projevuje ve třech fázích:

1) Smrštění v tekuté fázi (od teploty lití, do teploty počátku tuhnutí):

Průběh poklesu objemu je s teplotou lineární. Závisí na stupni přehřátí a součiniteli objemového smrštění kovu. Měrné objemové smrštění a celková změna objemu potom jsou následující:

$$\varepsilon_{V_{\text{tek}}} = \beta_{\text{tek}} \cdot (T_{\text{licí}} - T_{\text{liq}}) = \beta_{\text{tek}} \cdot \Delta T \quad (14)$$

$$\Delta V = \varepsilon_{V_{\text{tek}}} \cdot V_0 = \beta_{\text{tek}} \cdot \Delta T \cdot V_0 \quad (15)$$

$\varepsilon_{V_{\text{tek}}}$ – měrné objemové smrštění [-]

β_{tek} – součinitel objemového smrštění [1/°C]

$T_{\text{licí}}$ – teplota lití kovu [°C]

T_{liq} – teplota liquidu kovu [°C]

ΔV – celková změna objemu odlitku [m³]

V_0 – objem kovu v odlitku [m³]

Součinitel objemového smrštění závisí poněkud na obsahu uhlíku, vzrůstá průměrně o 20% na každé 1% obsahu uhlíku. Důvodem je snižování teploty likvidu slitiny se zvyšujícím se obsahem uhlíku ve slitině a tím se zvyšuje přehřátí i objemové smrštění.

2) Smrštění při fázové přeměně (u slitin v intervalu krystalizace):

Nastává při změně skupenství v intervalu teplot liquidu a solidu. Ke zmenšování objemu dochází vznikem prvých dendritů, tedy pevné fáze. Jde-li o objemové tuhnutí, nastává stahování v celém, nebo převážném objemu odlitku. Při řízeném postupném tuhnutí se vytváří soustředěná staženina od povrchu k tepelné ose odlitku. V případě sledovaného procesu není zjišťován výskyt staženin a tedy je nálitkování zjevně dostatečné.

3) Smrštění v tuhém stavu (od teploty solidu do normální teploty):

Smrštění odlitku v pevném stavu se projevuje změnou lineárních rozměrů i změnou objemu odlitku, přičemž objemové smrštění je přibližně třikrát větší, než lineární smrštění:

$$\varepsilon_{V_{\text{pev}}} \approx 3 \cdot \varepsilon_d \quad (16)$$

$$\varepsilon_{d_{\text{pev}}} = \alpha_d \cdot (T_z - T_0) \quad (17)$$

$$L_1 = L_0 \cdot \{ 1 + \alpha_d \cdot (T_z - T_0) \} \quad (18)$$

$$V_1 = V_0 \cdot \{ 1 + \alpha_v \cdot (T_z - T_0) \} \quad (19)$$

$\varepsilon_{V_{\text{pev}}}$ – objemové smrštění v pevném stavu [-]

$\varepsilon_{d_{\text{pev}}}$ – lineární smrštění v pevném stavu [-]

α_d – součinitel lineárního smrštění [10^{-6} K^{-1}]

α_v – součinitel objemového smrštění [10^{-6} K^{-1}]

L_1 – lineární změna rozměrů s teplotou [mm]

L_0 – délka odlitku při T_0 [mm]

V_1 – objemová změna rozměrů s teplotou [mm^3]

V_0 – objem odlitku při T_0 [mm^3]

T_z – teplota počátku smrštění [$^{\circ}\text{C}$]

T_0 – normální teplota (okolí) [$^{\circ}\text{C}$]

Vzhledem k důsledkům nás zajímá především smrštění odlitku v pevném stavu lineární. Odlitek začíná lineárně smršťovat od okamžiku, kdy se z vyloučených dendritů vytvoří pevný skelet po celém obvodu odlitku. To nastává při teplotě povrchu odlitku mezi teplotou liquidu a solidu. Prvé dendrity, s nižším obsahem příměsí mají vyšší teplotu krystalizace, než poslední ztuhlá tavenina. Proto odlitek lineárně smršťuje, když je uprostřed jeho stěny ještě přehřátá tavenina. U slitin železa je průběh lineárního smrštění ovlivněn fázovou transformací $\gamma \rightarrow \alpha$, doprovázenou změnou objemu mřížky. Přítomností atomu uhlíku v mřížce γ fáze se její parametr zvětší a vyloučením uhlíku se opět zmenší. Rychlím ochlazením přes fázovou přeměnu se zabrání vyloučení uhlíku z mřížky, takže nedojde ke zmenšení objemu a přeměna $\gamma \rightarrow \alpha$ proběhne v plném rozsahu zvětšení objemu při přeskupení atomů v mřížce.

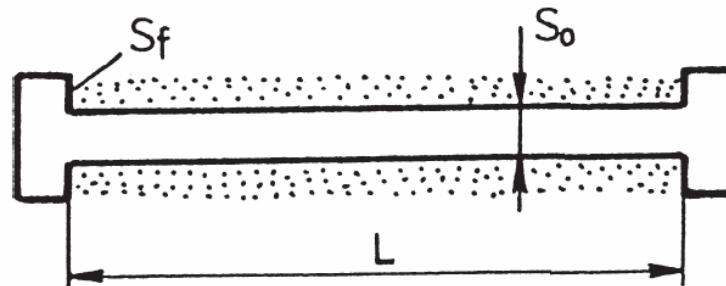
Celkové smrštění je potom součtem dílčích smrštění:

$$\varepsilon_{V_c} = \varepsilon_{V_{\text{tek}}} + \varepsilon_{V_{\text{tuh}}} + \varepsilon_{V_{\text{pev}}} \quad (20)$$

Jeho velikost je u dané slitiny ovlivněno především obsahem uhlíku, který zvyšuje smrštění v tekutém a v tuhém stavu (zvětšení intervalu tuhnutí), dále licí teplotou a stupněm přehřátí taveniny. Smrštění samo o sobě nemá na vznik trhlin, či prasklin teoreticky vliv, hraje však významnou roli ve spojení s dalšími faktory, díky kterým mluvíme o „bržděném smrštění“, ke kterému u sledovaného odlitku jednoznačně dochází, jak bude diskutováno dále.

Bržděné smrštění vzniká v případě, je-li odlitku jakýmkoliv způsobem bráněno v jeho smršťování. Smrštění bývá omezeno vnějšími silami, působením mechanického odporu formy, či jader a konstrukcí odlitku. Velikost smrštění pak závisí na síle odporu, čili na velikosti opěrných ploch přírub, poddajnosti formy. Bržděné smršťování vyvolává v odlitku tahové pnutí, označované také jako smršťovací, které pak způsobuje povrchové trhliny v odlitku.

Sledovaný odlitek vzhledem ke své konstrukci vyvolává proti smršťování jak mechanický odpor, tak tepelný odpor, který je způsoben rozdílnou tloušťkou stěn, kdy silnější stěna odlitku snadněji prohřeje formu a v tepelných centrech (místa vyššího prohřátí formy, či jádra) je pak nejvyšší pravděpodobnost vzniku trhliny. To je způsobeno vznikem smršťovacího napětí, které vzniká ve ztuhlé povrchové vrstvě, přičemž stačí již vyloučení přibližně 20% pevné fáze – dendritů a jejich spojení v kompaktní skelet. Napětí, které se vlivem odporu formy vyvine v odlitku je dáno vztahem prezentovaným na zjednodušeném modelu tyče s přírubami (viz Obr.5.2.1).



Obr.5.2.1: Model tyče s přírubami pro výpočet napětí v odlitku. [20]

$$\sigma_o = \varepsilon_o \cdot E_o = E_o \cdot \alpha \cdot (T_1 - T_2) \quad (21)$$

σ_o – napětí v smršťujícím odlitku dané odporem formy [MPa]

ε_o – deformace odlitku daná tepelným smrštěním [-]

E_o – modul pružnosti natuhlé vrstvy [MPa]

α – součinitel lineárního tepelného smrštění

T_1 – teplota odlitku v okamžiku smršťování (pod teplotou liquidu) [°C]

T_2 – okamžitá střední teplota ztuhlé vrstvy odlitku, do které napěťový děj sledujeme (pod teplotou solidu) [°C]

Čím je T_2 nižší, tím je vyšší smršťovací napětí, což ovšem platí jen do určité teploty, kdy již má ztuhlá vrstva odlitku takovou pevnost, že překoná odpor formy. Ve formě vzniká akcí odlitku jako reakce tlakové napětí:

$$\sigma_f = \varepsilon_f \cdot E_f \quad (22)$$

σ_f – tlakové napětí ve formě [MPa]

ε_f – deformace formy [-]

E_f – modul pružnosti formy [MPa]

Poměrná deformace odlitku je pak dána rozdílem smrštění odlitku a deformace formy tlakem, z čehož vyplývá i vztah pro napětí v odlitku se smršťováním bržděným formou:

$$\varepsilon_{po} = \alpha \cdot (T_1 - T_2) - \varepsilon_f \quad (23)$$

$$\sigma_o = E_o \cdot \{ \alpha \cdot (T_1 - T_2) - \varepsilon_f \} \quad (24)$$

ε_{po} – poměrná deformace odlitku [-]

σ_o – napětí v odlitku při smršťování bržděným formou [MPa]

Z rovnice vyplývá, že je-li deformace (poddajnost) formy nebo jádra nulová, vznikají v odlitku maximální smršťovací napětí. Rovnováhou tahových sil v odlitku a tlakových ve formě potom získáme upravený vztah pro deformaci formy na základě opěrné plochy formy u přírub odlitku a průřezu odlitku, a z toho dále rovnici pro smršťovací napětí v odlitku závislé na konstrukci odlitku, vlastnostech kovu, formy a teplotním intervalu v odlitku:

$$\sigma_o \cdot S_o = \sigma_f \cdot S_f = E_f \cdot \varepsilon_f \cdot S_f \rightarrow \varepsilon_f = (\sigma_o \cdot S_o) / (E_f \cdot S_f) \quad (25)$$

$$\sigma_o = [\alpha(T_1 - T_2) - \{(\sigma_o \cdot S_o) / (E_f \cdot S_f)\}]$$

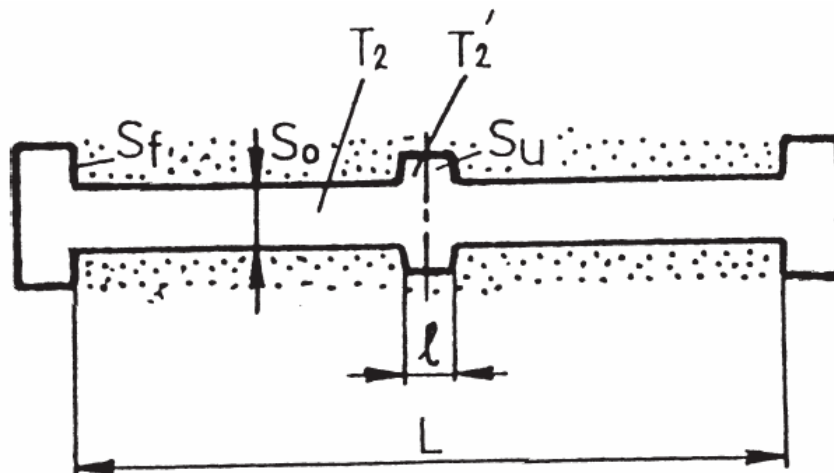
$$\sigma_o = \alpha(T_1 - T_2) / \{(1 / E_o) + (S_o / S_f \cdot E_f)\} \quad (26)$$

S_o – průřez odlitku [mm²]

S_f – opěrná plocha formy u přírub [mm²]

Z finálního vztahu pro odlitek s bržděným smrštěním plyne, že smršťovací napětí nezávisí u odlitku stejného průřezu na jeho délce. Odlišně je tomu však v případě odlitku s tepelným uzlem, což je i případ sledovaného odlitku. Nachází-li se na odlitku tepelný uzel, jedná se o pevnostně slabé místo v tuhnutí vrstvě. Teplota vrstvy je zde během tuhnutí neustále vyšší, než ve zbytku odlitku a pevnost vrstvy je tím pádem nižší. Důsledkem je koncentrace smršťujícího napětí, což znamená zvýšení pravděpodobnosti k výskytu trhliny v tomto místě, navíc zvýšení možnosti trhlín vnitřních.

Výpočet pnutí v odlitku s tepelným uzlem dle modelového odlitku na obrázku (viz Obr.5.2.2) má pak následující předpoklady: teplota v uzlu je vyšší, než ve zbytku odlitku, průřez uzlu je větší, než průřez zbytku odlitku.



Obr.5.2.2: Model tyče s tepelným uzlem pro výpočet napětí. [19]

Poměrná deformace a absolutní deformace odlitku, absolutní deformace tepelného uzlu a celková deformace odlitku jsou dány vztahy:

$$\varepsilon_o = \Delta L_o / L_1 ; (\text{kde } L_1 = L - l) \quad (27)$$

$$\Delta L_o = L_1 \cdot \varepsilon_o = L_1 \cdot \alpha(T_1 - T_2) \quad (28)$$

$$\Delta l_u = l \cdot \alpha(T_1 - T_2') \quad (29)$$

$$\Delta L_c = \Delta L_o + \Delta l_u = L_1 \cdot \alpha(T_1 - T_2) + l \cdot \alpha(T_1 - T_2') \quad (30)$$

ΔL_o – poměrná deformace odlitku [-]

L_1 – délka zbylé části mimo tepelný uzel [mm]

Δl_u – absolutní deformace tepelného uzlu [-]

ΔL_c = celková absolutní deformace odlitku [-]

T_2 – teplota odlitku [°C]

T_2' – teplota v místě tepelného uzlu ($T_2' > T_2$) [°C]

Celková deformace se soustředí v tepelném uzlu a lze ji tedy vztahovat na deformaci tepelného uzlu ε :

$$\varepsilon = \Delta L_c / l = \{L_1 \cdot \alpha(T_1 - T_2) / l\} + \alpha(T_1 - T_2') \quad (31)$$

Dosazením předchozí rovnice (31) do vztahu pro napětí v odlitku s bržděným smrštěním (bez tepelného uzlu (26)) získáme postupně úpravami vztah pro smršťující napětí v odlitku s tepelným uzlem:

$$\sigma_o = \alpha \{L_1 / l (T_1 - T_2) - (T_1 - T_2')\} / \{(1 / E_o) + (S_u / S_f \cdot E_f)\}$$

$$\sigma_o = \alpha \{L / l (T_1 - T_2) - (T_2' - T_2)\} / \{(1 / E_o) + (S_u / S_f \cdot E_f)\} \quad (32)$$

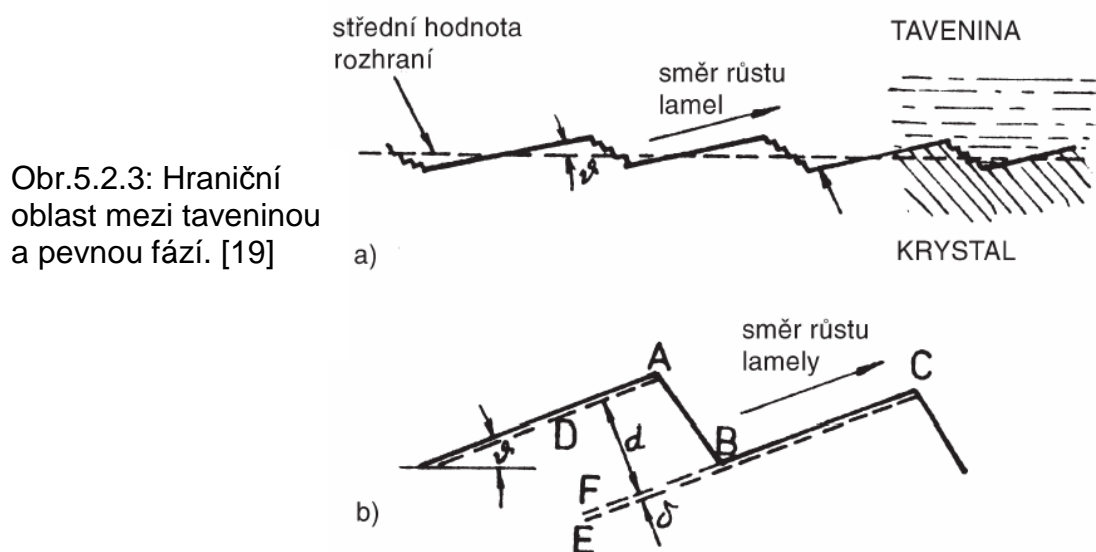
Z rovnice vyplývá, že v odlitku s tepelným uzlem a tedy nehomogenním teplotním polem je hodnota smršťovacího napětí závislá na délce odlitku ve

smyslu čím větší délka, tím větší i výsledné pnutí, které se následně koncentruje v teplem uzlu.

b) Pevnost krystalu, vliv doprovodných prvků:

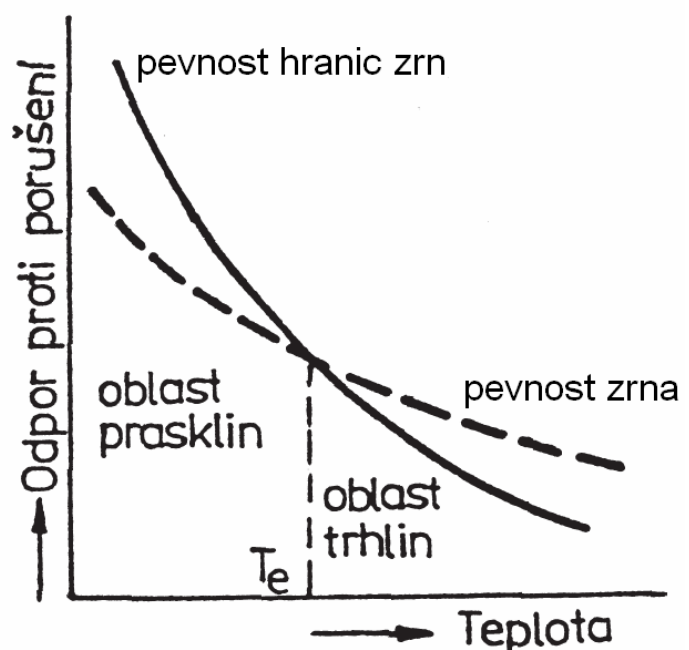
Vznik trhliny při vysokých teplotách v oblasti solidu a intervalu cca 100°C pod ním přímo souvisí a pevnostními a plastickými vlastnostmi kovu v okamžiku jeho ztuhnutí. Tzn. s pevností vlastního krystalu, ale zejména s pevností hranic zrn (viz Obr.5.2.3) (které mají při vysokých teplotách nižší pevnost) a kterou obecně označujeme jako krystalizační pevnost kovu, která se při tuhnutí první vrstvičky ocelového odlitku pohybuje okolo 1 MPa při teplotě 1410 °C .

Významný vliv na pevnostní, plastické a fyzikální vlastnosti krystalu mají odchylky od ideálního rozložení atomů v mřížce. Nejčastějšími poruchami jsou poruchy bodové, jako substituce cizího atomu v základní strukturní mřížce nebo intersticiální atom, vznik vakancí, dále dislokace a mozaiková struktura. V daných podmínkách však převládají poruchy, které vznikají s nejmenší energií. Dislokace jsou však v mřížce přítomny vždy. Předpokládá se, že k jejich vzniku při tuhnutí dochází následkem odchylek od zákonitého růstu krystalů, např. nerovnoměrným ochlazováním, zamrznáním vakancí v mřížce, vlivem segregace nečistot a příměsí a vůbec nepravidelností tuhnutí. Převažující množství mřížkových poruch však vzniká náhlými změnami teplot až po ztuhnutí – v době chladnutí odlitku, důsledkem těchto poruch je pak pokles pevnosti kovu, což má přímou souvislost se vznikem poruch materiálu. Hraniční oblast mezi taveninou a pevnou fází při tuhnutí není hladká, ale je složena ze stupňů (lamel) vymezených krystalografickými rovinami (viz Obr.5.2.3-a). Se střední polohou hranice tuhnutí svírají lamely úhel δ . Je-li při tuhnutí rozdělovací koeficient $k < 1$, pak jsou příměsy od hranice vytlačovány a difundují do taveniny. Ke splnění této podmínky musí být koncentrace příměsí c_B (v bodě B) vyšší, než koncentrace příměsí c_A ve ztuhlém kovu v místě A (viz Obr.5.2.3-b). Tento proces má důležitý vliv na nižší kvalitu a teplotu tání pozdějších hranic zrn.



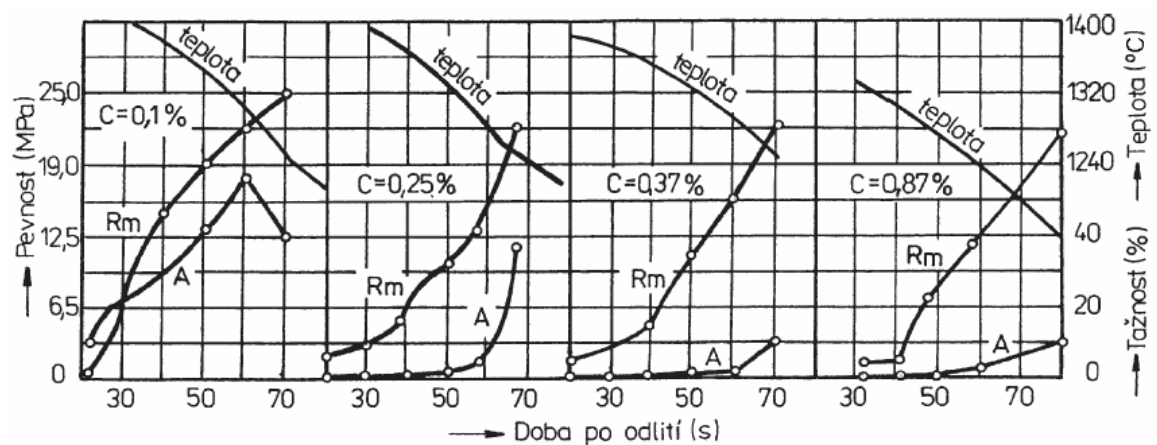
Obr.5.2.3: Hraniční oblast mezi taveninou a pevnou fází. [19]

Krystalizace taveniny probíhá v určitém teplotním gradientu. Při poklesu teploty krystalu pod bod tání nemohou přebytečné vakance zcela vymizet difuzí na povrch a proto kondenzují a tvoří tzv. agregáty, jejichž nejvýhodnější tvar jsou ploché destičky. Takováto destička se tvoří v určitém místě krystalu těsně za rozhraním pevné a kapalné fáze. Teplota krystalu v tomto místě klesá, destička roste a po dosažení kritické velikosti dojde k zhroucení mřížky v okolí destičky a vznikne dislokační smyčka. K takovým poruchám dochází v krystalu během jeho tuhnutí. Podchlazením taveniny vyrůstají od povrchu odlitku z mnoha různě orientovaných zárodků dendrity a v určitých oblastech vytvářejí síť dendritů. V dotykových místech dendritů vzniká rozhraní, čili hranice zrn. Jsou-li dendrity vzhledem k sobě dezorientovány o úhel ν , vytvoří se v hraničním pásmu dislokační síť. Hranice zrn jsou hlavním činitelem ze strany materiálu při vzniku trhlin. Představují přechodovou zónu mezi sousedními dendrity s různou orientací a jejich pevnostní, plastické a fyzikální vlastnosti jsou rozhodující při náchylnosti soustavy ke vzniku krystalizačních trhlin. Obsahují poruchy mřížky, vysoký obsah segregujících prvků a nečistot, což se projeví na poklesu teploty tuhnutí (hranice zrn tuhnou nejpozději), poklesu pevnostních a plastických vlastností ztuhlého kovu. Tento vliv však není shodný při vysokých a nízkých teplotách. Při tahovém napětí za nízkých teplot se deformace v blízkosti hranic zrn snižují vlivem zvýšeného odporu proti deformacím v této zóně a nastává zpevňování hranic zrn. Tento jev roste se stupněm disperzности zrn a naopak klesá se vzdáleností od hranic zrn. Pevnost hranic při nižší teplotě se zvyšuje také zaklíněním různě orientovaných zrn u polykrystalického kovu. Z těchto poznatků plyne, že pevnost hranic zrn je u polykrystalického kovu vyšší než pevnost vlastního zrna při nízkých teplotách (transkrystalické lomy-praskliny) a naopak je tomu při teplotách vyšších (interkrystalické lomy-trhliny). Neexistuje však přesná hranice, daná jedinou teplotou (ekvikohezní teplota-viz Obr. 5.2.4), která by přesně dělila oblast vzniku trhlin a prasklin dle předchozích poznatků.



Obr.5.2.4: Změna pevnosti hranic zrn a vlastního zrna v závislosti na teplotě. [19]

Hranice mezi oblastí vyšší pevnosti hranic zrna, nebo vlastních zrn se znatelně mění s obsahem příměsí, jako je uhlík a především síra, která vytváří nízkotavitelné složky a posouvá oblast vzniku trhlin nižších teplot. Uhlík ovlivňuje u oceli teplotu tání, počátek i hodnotu lineárního smrštění a tím velikost smršťovacího napětí a především pevnostní a plastické vlastnosti kovu. Podle experimentálních měření i praktických zkušeností má největší odolnost proti vzniku trhlin ocel s nižším obsahem uhlíku, než je peritektický bod, tj. do 0,2 %C. K vyšší odolnosti proti trhlinám nestačí pouze vyhovující pevnost v tahu, ale je nutná také vyhovující tažnost kovu. Tažnost přitom s rostoucím obsahem uhlíku klesá, jak ukazují křivky pro ocel s obsahy uhlíku 0,1%; 0,25%; 0,37% a 0,87% (viz Obr.5.2.5), společně s průběhy pevností, v závislosti na době po odlití.



Obr.5.2.5: Pevnosti a plastické vlastnosti ocelí v závislosti na obsahu uhlíku a době po odlití. [19]

Dalšími prvky významně ovlivňujícími pevnostní a plastické vlastnosti oceli za vysokých teplot jsou síra a fosfor. Zvýšený sklon oceli k trhlinám je v přítomnosti síry způsoben sulfidem železa, který se vylučuje po hranicích zrn a snižuje jejich pevnost. Podstata je v tom, že FeS má nižší teplotu bod tání ($\approx 950\text{ }^{\circ}\text{C}$) a při tuhnutí tvoří na hranicích tekuté vrstvy, jež snižují pevnost za vysokých teplot. Škodlivost síry je také v tom, že silně reaguje (rozdělovací koeficient K_0 je malý, 0,03-0,05), tudíž více segreguje a soustřeďuje se v tavenině před frontou tuhnutí. V přítomnosti manganu se váže síra na MnS, který podle dosavadních názorů náchylnost k trhlinám za vysokých teplot snižuje, podle novějších představ to není jednoznačné. Teoretický obsah manganu k vázání síry je přitom 1,71krát vyšší, než její obsah, čímž se omezí její nepříznivý účinek.

Fosfor tvoří se železem křehký tuhý roztok a fosfidy železa a snižuje tak houževnatost při nižších a normálních teplotách, čímž se zvyšuje náchylnost ocele k praskání, dosud uváděné pouze za studena, podle dnešních zjištění se fosfor podílí na křehnutí materiálu i za vysokých teplot. Škodlivý vliv fosforu se uplatňuje tím více, čím vyšší je obsah uhlíku. Fosfor rovněž zvyšuje sklon oceli k popouštění křehkosti vyloučením submikroskopických fosfidů. Rovnovážný rozdělovací koeficient $K_0 = 0,13-0,2$; čili méně segreguje než síra.

Z důvodu vysokého stupně segregace nízkotavitelných fází jsou v oceli nežádoucí také Pb, Bi, Sb, Sn, As, Zn, N₂ a O₂. Je prokázáno, že v čistém železe fosfor, ani barevné kovy nereagují, jejich škodlivý vliv se naopak prokazuje u ocelí obsahujících mangan a křemík. To je způsobeno vlivem manganu a křemíku na zvýšení segregace zmiňovaných prvků na hranici zrn. Je zřejmé, že nízký obsah Mn a Si vyžaduje nízký obsah síry a dalších prvků a tedy čistou ocel. Watanabe a Murakami definovali posuzování náchylnosti materiálu ke křehnutí za zvýšených teplot pomocí J-faktoru:

$$J = (\%Si + \%Mn) \cdot (\%Pb + \%Sn + \%Sb + \%As) \quad (33)$$

Hodnoty J-faktoru $J = 10 \cdot 10^{-3}$ již svědčí o odolnosti oceli vůči křehkým lomům za zvýšených teplot. (Oceli pro komponenty s vysokým namáháním za vysokých teplot musí vykazovat J-faktor ještě nižší, přibližně do $8 \cdot 10^{-4}$.)

5.3 Optimalizace výrobního procesu

Na základě zjištěných možných příčin je nyní možné určit opatření potřebná pro zamezení vzniku vyskytujících se vad. Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o komplexní souhrn několika činitelů, které ovlivňují možnosti vzniku vad, přičemž míra jejich vlivu se různí. Za nejvíce problematický lze předpokládat vliv tuhosti formy, způsobující vysoké napětí při brzděném smršťování během tuhnutí odlitku s tepelným uzlem. Tuto teorii potvrzuje majoritní výskyt vad právě v přechodové oblasti od hlavního tepelného uzlu, kterým je vnější věnec kola, do podstatně tenčího dna odlitku a tedy v místě napěťové špičky. V tomto směru je možné omezit vznik vad teoreticky dvěma možnostmi. V prvním případě změnou konstrukce odlitku (zmenšení tepelného ulzu, žebrování pro rychlejší chladnutí pod tepelným uzlem,...), která by však byla v rozporu s požadavky zadavatele zakázky. V případě druhém změnou formovací směsi na směs poddajnější, která by nekladla takový odpor smršťování odlitku. Tato varianta je však nerentabilní, poněvadž zavedení nového systému formovací směsi by bylo nepochybně ekonomicky nevýhodnější, než přínos, kterým by teoreticky bylo nižší procento potenciálních neshodných odlitků při jejím zavedení. Dalším vlivným činitelem je chemické složení oceli, konkrétněji obsah uhlíku, křemíku a manganu a metalurgická čistota oceli ve formě obsahu nežádoucích prvků jako jsou především síra a fosfor, ale také antimon, cín, bizmut, či olovo. Obsah uhlíku v dané oceli je dán dle normy intervalem 0,32-0,37 %C, což je již poměrně vysoko nad obsahem uhlíku v peritektickém bodě. Ocel tedy bude mít relativně vysoké smršťovací napětí a nízkou tažnost za vysokých teplot. Z tohoto důvodu již bylo v metalurgii zavedeno snížení obsahu uhlíku na jeho spodní hranici danou intervalem normy pro chemické složení odlévané oceli (viz kap.4.1/c)). Jedná se však stále o poměrně vysoký obsah uhlíku, mající potenciálně nepříznivý vliv na vznik trhlin, ovšem vzhledem k normě zadané oceli není možné tento již dále snižovat. Vliv obsahu křemíku a manganu lze předpokládat jako zanedbatelný vzhledem k jejich nízkému obsahu v odlévané oceli, navíc jejich obsah není možné příliš snižovat z důvodů dezoxidace. Obsah síry a fosforu je poměrně nízký (v intervalu dovoleném normou chemického složení oceli) a vzhledem k možnostem tavicího agregátu (elektrická oblouková pec) ani jeho případné další snižování není reálné.

Výběrem kontrolovaných vsázkových surovin je výskytu vyšších obsahů prvků Pb, Sn, Bi, As zabráněno. Pravidelně se tyto nesledují chemickou analýzou, ale namátkový rozbor prokázal obsahy prvků Pb, Sn a As na úrovni řádově tisícín procenta. J-faktor dané oceli se při aktuálním metalurgickém zpracování pohybuje okolo hodnot $10 \cdot 10^{-3}$ a tedy by ocel měla mít ještě dostatečnou odolnost vůči lámavosti za vyšších teplot. Lící teplota se drží na spodní hranici, nízko nad úrovní liquidu a tedy i její případný negativní vliv lze vyloučit. Posledním prokazatelným negativním činitelem je tepelné zpracování. Zde se však již nejedná o důvod ke vzniku trhlin, nýbrž k jejich šíření ve formě praskliny po kalení, nebo vzniku prasklin samotných. Důvodem je vnesení tepelného pnutí do odlitku během tepelného zpracování, které se sčítá s napětí, které již v odlitku působilo. Tomuto vlivu lze zabránit nižší kalící teplotou z možného intervalu a mírnějším kalícím prostředím. Proto bylo zavedeno kalení do oleje místo původního kalení do vody. Výskyt vad se tímto krokem omezil. Výjimkou je pouze nedodržení technologické kázně, nebo vnější nepředpokladatelné vlivy, jako vyteklá chladící voda z kalící pece do olejové lázně, během kalení jedné z posledních vyráběných dávek sledovaných odlitků.

ZÁVĚR

Aplikace metod nedestruktivního zkoušení byla prokázána jako jeden z vhodných nástrojů pro kontrolu jakosti slévárenské výroby. Její přínos je dán možností odhalování vad, které nejsou zjevné na první pohled a jejichž škodlivost je o to vyšší, čím později během výroby jsou zjištěny. Použití metod NDT z vlastní iniciativy výrobního podniku umožňuje zachytit neshodný odlitek ve fázi výroby, kdy způsobuje nejmenší ekonomické ztráty a volba adekvátní NDT metody přitom nemusí znamenat nevýhodné zvýšení výrobních nákladů. Vlastní zjištění vady však není postačující pro zvyšování jakosti výroby. Dalším z nutných kroků je správná klasifikace vady, určení možných příčin jejího vzniku a zhodnocení možných protiopatření. Na základě identifikace vad v rámci sledovaného slévárenského procesu již slévárna provedla několik kroků ke snížení procenta neshodných výrobků. Zavádění dalších protiopatření pro zabránění výskytu těchto vad je otázkou potenciálního přínosu daného opatření v poměru k jeho nákladnosti. Dalším omezením v tomto směru jsou požadavky zadavatele zakázky a tedy požadovaná konstrukce odlitku a odlévaná slitna. Tyto potenciální příčiny vzniku slévárenských vad nelze ovlivnit bez souhlasu zadavatele zakázky se změnou. Prokázalo se také, že vznik některých slévárenských vad je komplexním součinem více vlivů a tedy i k zabránění vzniku těchto vad je třeba přistupovat komplexně.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. Současnost a perspektivy nedestruktivní defektoskopie. *MM Průmyslové spektrum*, únor 2002, č. 1/2, s. 52
2. FIALA, J. Nedestruktivní testování - jeho poslání, současný stav a trendy. *MM Průmyslové spektrum*, červen 2005, č. 6, s. 20
3. NDT Education Resource Center. *Introduction to Magnetic Particle Inspection [online]*. Iowa State University, USA. [cit. 2009-02-16]. Dostupné z URL <<http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/MagParticle/Introduction/history.htm>>.
4. NDT Education Resource Center. *Introduction to Ultrasonic Testing [online]*. Iowa State University, USA. [cit. 2009-02-16]. Dostupné z URL <http://www.ndt-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Ultrasonics/cc_ut_index.htm>.
5. VĚCHET, Mojmír; KESL, Jaroslav; ŠPIKA, Lumír; EDER, Vladimír. *Defektoskopie v otázkách a odpovědích*. Praha: SNTL Nakladatelství technické literatury, 1989. 328 stran. ISBN 80-03-00100-5.
6. www.ndt.cz-nedestruktivní kontrola. *Princip metody MT [online]*. [vydáno 2009-02-02]. [cit. 2009-03-06]. Dostupné z URL <http://www.ndt.cz/prilohy/10/princip_metody_MT.doc>.
7. www.ndt.cz-nedestruktivní kontrola. *Způsoby magnetování [online]*. [vydáno 2009-02-28]. [cit. 2009-03-06]. Dostupné z URL <http://www.ndt.cz/prilohy/28/zpusoby_magnet.doc>.
8. HAYES, Charles. The ABC's of nondestructive weld examination. *Welding Journal*, březen 1997, s.46.
9. *Internetová prezentace společnosti Emirates Techno Casting [online]*. Spojené Arabské Emiráty. [cit. 2009-03-06]. Dostupné z URL <<http://www.emiratestechnocasting.com/index.htm>>.
10. www.ultrazvuk.cz-stránky o ultrazvuku. *Základní principy kontroly ultrazvukem [online]*. [cit. 2009-03-06]. Dostupné z URL <http://www.ultrazvuk.cz/prilohy/39/zaklad_uz.html>.
11. Královopolská, a.s, podniková příručka. *Zkoušení materiálu ultrazvukem : základy ultrazvukové defektoskopie*. [198-?]. 25 s.

12. Katalog společnosti GE Inspection Technologies. *The total probe range for your ultrasonic equipment [online]*. [cit. 2009-04-28]. Dostupné z URL <http://www.geinspectiontechnologies.com/download/products/ut/pc/GEIT-20117EN_ultrasonic-transducer-catalog.pdf>.
13. Dörrenberg Edelstahl GmbH, materiálový list. *Data sheet 1.6582 [online]*. [cit. 2008-12-14]. Dostupné z URL <http://www.doerrenberg.de/fileadmin/template/doerrenberg/stahl/DatenblaetterDeu/1.6582_de.pdf>.
14. Podnikový materiálový list JMA, Hodonín. *1.6582, Cr-Ni-Mo ocel k zušlechťování*.
15. ITW Tiede, GmbH, materiálový list. *Ferrotest GWH, Mobile Rissprüfgeräte [online]*. [cit. 2009-05-09]. Dostupné z URL <http://www.tiede.de/media/images/uploads/Ferrotest_GWH_D_2008.pdf>.
16. GE Inspection Technologies. *Krautkrämer USM 35X [online]*. [cit. 2009-04-28]. Dostupné z URL <http://www.geinspectiontechnologies.com/download/products/ut/fd/GEIT-20002US_usm35x.pdf>.
17. ELBEL, Tomáš; STRÁNSKÝ, Karel. Vady odlitků, identifikace vad odlitků a příčin jejich vzniku. *Slévárství*, 2001, č. 9, s. 539 - 543.
18. Podnikový dokument Královopolská, a.s. Protokol o metalografickém šetření odlitku. [vydáno 2008-03-06].
19. HAVLÍČEK, František; STRÁNSKÝ, Karel. Vady odlitků, trhliny a praskliny v odlitcích. *Slévárství*, 1998, č. 1, s. 37 - 46.
20. HAVLÍČEK, František. *Teorie slévárství*. Vysoká škola báňská v Ostravě, Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství, 1992. 130 stran.

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 Obr.4.2.1: Modelové zařízení vršku formy s izolací pro nálitky.
Příloha 2 Obr.4.2.2: Modelové zařízení pro spodek formy se založenými prvky vtokové soustavy(šamotové trubky).
Příloha 3 Obr.4.2.3: Zasypání vršku formy chromitovou směsí v oblasti tepelných uzlů.
Příloha 4 Obr.4.2.4: Hotový vršek formy opatřený nátěrem. Detail na dutiny nálitků.
Příloha 5 Obr.4.2.5: Detail formování 3 zkušebních klínů ve spodku formy.
Příloha 6 Obr.4.2.6: Výkres součásti s zadavatelem vyznačenými oblastmi s požadovanou UZ kontrolou.
Příloha 7 Obr.4.2.7: Kontrola nastavení UZ na stupňovitém etalonu.
Příloha 8 Obr.4.3.2.1: Zkoušení sledovaného odlitku ultrazvukem.
Příloha 9 Obr.4.3.2.2: UZ kontrola vnitřního náboje kola.
Příloha 10 Obr.4.3.2.3: Detail postupu tažení sondy cik-cak a následně kruhově po obvodu vnitřního náboje.
Příloha 11 Obr.4.3.2.4: Schematické vyznačení překrývání stop při tažení sondy po vnějším věnci kola.
Příloha 12 Obr.5.1.1: Vyznačení míst výskytu indikací na surovém odlitku.
Příloha 13 Obr.5.1.2: Detail trhliny na vyříznutém bloku.
Příloha 14 Obr.5.1.3: Začátek trhliny.
Příloha 15 Obr.5.1.4: Koncová část trhliny.
Příloha 16 Obr.5.1.5: Detail na povrch lomu.