

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství

Studijní zaměření: Katedra materiálů a strojírenské metalurgie

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Hodnocení kvality ozubených kol vhodnými metodami NDT

Autor: **Vilém VÍTOVEC**

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

Akademický rok 2016/2017

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval všem, kteří se podíleli na mé bakalářské práci, především vedoucímu panu Ing. Petru Benešovi, Ph.D. za odborné rady a vedení práce, panu Ing. Jiřímu Hájkovi za rady ohledně chemicko-tepelného zpracování a Ing. Markétě Novákové za pomoc s metalografií. Dále děkuji zadávající firmě MKV ozubená kola s. r. o. za zadání práce a podpůrné materiály a celé mojí rodině za podporu.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ (BAKALÁŘSKÉ) PRÁCE

AUTOR	Příjmení Vítovec	Jméno Vilém	
STUDIJNÍ OBOR	D2301 „ Katedra materiálů a strojírenské metalurgie“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Beneš, Ph.D.	Jméno Petr	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Hodnocení kvality ozubených kol vhodnými metodami NDT		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2017
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	64	TEXTOVÁ ČÁST	63	GRAFICKÁ ČÁST	
---------------	----	---------------------	----	--------------------------	--

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Bakalářská práce je zaměřena na nedestruktivní zkoušení materiálů s ohledem na použití u ozubených kol a součástí používaných u převodových zařízení. V teoretické části jsou zachycené nedestruktivní zkoušky pro použití hodnocení ozubených kol a dalších strojních součástí. Dále jsou zde uvedeny druhy a postupy při chemicko-tepelném zpracování s ohledem na ozubená kola a součásti převodovek. V praktické části navrhujeme postup hodnocení kvality chemicko-tepelného zpracování metodou vířivých proudů.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p style="text-align: center;">ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Defektoskopie, NDT, chemicko-tepelné zpracování, Vířivé proudy, CHTZ</p>

SUMMARY OF DIPLOMA (BACHELOR) SHEET

AUTHOR	Surname Vítovec	Name Vilém	
FIELD OF STUDY	D2301 "Department of Material Science and Technology"		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Beneš, Ph.D.	Name Petr	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Evaluate the quality of toothed wheel assistance NDT		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	1999
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	64	TEXT PART	63	GRAPHICAL PART	
----------------	----	------------------	----	-----------------------	--

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	Bachelor thesis is focused on non-destructive testing of materials with respect to the use of gears and components used for gearing. In theoretical part are captured non-destructive tests for the evaluation of gears and other machine components. In addition there are also mentioned kinds of chemical heat procedures with respect to the gears and gearbox components. In the practical part we propose a procedure of the evaluation of the quality of chemical heat treatment by the method of eddy currents.
KEY WORDS	Non-destructive, NDT, Eddy currents, Chemical-thermal processing

Obsah

1	Úvod	7
2	Cíl práce	8
3	Základní dělení vad [1], [12].....	9
3.1	Přehled používaných defektoskopických metod (s ohledem na použití u ozubených kol) [1], [12]	10
4	Kapilární zkouška (penetrační) [1], [2], [12].....	11
4.1	Postup kapilární zkoušky [12]	11
5	Zkoušky ultrazvukem [1], [2], [12].....	14
5.1	Metody ultrazvukové defektoskopie [3], [2], [12]	14
6	Zkoušky magnetické a elektrické	18
6.1	Zkoušky magnetické [2], [12]	18
6.2	Zkoušky indukční [2].....	19
6.3	Indikace vad na základě rozptylového pole (metoda magnetická polévací)	19
6.4	Indikace vad pomocí vířivých proudů [16], [4]	19
7	Způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování s ohledem na požadavky ozubených kol. [7]	23
7.1	Kalení a popouštění [7], [13].....	23
7.2	Tepelně-chemické zpracování [7]	24
7.3	Dělení metod tepelně-chemického zpracování [7]	24
7.4	Druhy chemicko-tepelného zpracování [7]	25
7.5	Pnutí a deformace při tepelném zpracování s ohledem na ozubená kola.....	30
8	Zadávací společnost MKV ozubená kola s.r.o. [14], [15].....	35
9	Návrh experimentálního programu.....	36
9.1	Porovnání materiálu a metalografické zkoušky	36
9.2	Výroba vzorků pro zkoušky chemicko-tepelného zpracování.....	40
9.3	Měření hloubky chemicko-tepelného zpracování	42
9.4	Hodnocení chemicko-tepelného zpracování na výrobku.....	56
10	Závěr.....	59
11	Seznam zdrojů.....	60
12	Seznam obrázků	62
13	Seznam grafů	63
14	Seznam tabulek.....	64
15	Seznam zkratk	64

1 Úvod

Kvalita a spolehlivost ozubených kol je dána především použitými materiály a jejich chemickou a tepelnou úpravou. Vlastnosti materiálů jsou ovlivněny technologickými postupy a dalšími parametry. Materiály nejsou vždy bez vady. Pro zkoumání kvality materiálu a jeho zpracování bylo vyvinuto mnoho různých hodnotících metod.

Tyto metody nejsou vždy stoprocentní, ale mezi sebou se velmi dobře doplňují. Žádná samostatně neumožňuje zjistit všechny vady, které se vyskytují ve výrobcích, ale pro stoprocentní kontrolu je možné použít kombinaci všech metod.

Testování a zkoušení materiálů se provádí buď laboratorně, nebo ve výrobě, popřípadě na místě montáže. V současné době zaujímá ve strojírenské výrobě pevné místo nedestruktivní zkoušení. Jeho použitím při zkoušení materiálů se dá předejít včasnému zjištění vady a tím i k značným finančním ztrátám.

Vady vznikají například nedokonalostmi během tepelného zpracování. Zda bude kvalita zpracování ozubených kol správná, o tom rozhoduje definice pojmu vada.

2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce bylo zjištění kvality tepelného zpracování u ozubených kol pomocí nedestruktivního zkoušení. V rámci práce byly hledány a navrženy metody testování materiálů po tepelném zpracování ozubených kol. Pro zjištění kvality byla použita metoda vířivých proudů včetně funkčních etalonů. Tato metoda je velice účinná pro hodnocení kvality tepelného zpracování pomocí cementace a následného kalení.

3 Základní dělení vad [1], [12]

Vadou materiálu je každá odchylka rozměru, tvaru nebo hmotnosti od vlastností předepsaných výkresy, normami nebo hodnoticím vzorem.

Vady se třídí do skupin a v jejich rámci se člení na jednotlivé druhy podle typu výrobku. Druhy vad nám určují příslušné státní nebo světové normy.

Obecně se vady dělí takto:

- A) Nedodržení chemického složení;
- B) Vady struktury:
 - nedodržení struktury;
 - strukturní heterogenity (segregace);
- C) Vměstky:
 - zadobeniny;
 - struskovitost;
- D) Dutiny:
 - bubliny;
 - póry;
 - bodliny;
 - staženiny;
 - řediny;
- E) Přerušení souvislostí:
 - trhliny;
 - praskliny;
- F) Nesprávné mechanické nebo fyzikální vlastnosti.

3.1 Přehled používaných defektoskopických metod (s ohledem na použití u ozubených kol) [1], [12]

Stanovení vad defektoskopickými metodami je ve většině případů nepřímé. V takových případech je prostředníkem fyzikální veličina, která mění své vlastnosti v závislosti na interakci s prostředím, kde mění své parametry. Takováto změna závisí na homogenitě prostředí, tj. zkoušeného materiálu. Zjištěním vad a jejich následným rozbořením je vytvořen základ pro nedestruktivní zkoušení.

Základním kritériem pro rozlišování defektoskopických metod je použitá energie nebo látka. Běžně používané metody dělíme podle schopnosti identifikace vad a jejich lokalizace na metody:

A) Povrchové vady:

- vizuální metody;
- penetrační (kapilární) zkoušky;
- magnetoinduktivní;

B) Vnitřní vady:

- akustické;
- radiologické.

Všechny tyto metody mohou mít mnoho variant, například k nim patří tepelné metody, akustická emise, optické metody a jiné.

Každá defektoskopická metoda je použitelná ve vymezené oblasti, která je dána fyzikální podstatou zkoušeného materiálu a jeho povrchu. Pokud je v praxi zapotřebí získat dokonalou představu o všech vadách, které se vyskytují ve výrobku, musí být použito vhodné kombinace více metod. Neexistuje jedna vhodná metoda, která by nám ukázala všechny vady ve zkušebním materiálu.

4 Kapilární zkouška (penetrační) [1], [2], [12]

Kapilární zkouška se používá pro zjišťování vad na povrchu materiálu. Jedná se o vady přímo spojené s povrchem a jsou na povrchu otevřené, například trhliny.

Metoda je účinná u materiálů, které nejsou pórovité, nátěrem ošetřené, nasákavé a rozpustné v použité detekční kapalině. Metoda využívá kapilárních jevů, tedy schopnosti látek vzlínat do trhlin. Následné uvolnění látek prozradí, kde se vada nachází. Tímto způsobem získáme informaci o velikosti vad a jejich tvaru. Nespornou výhodou této metody je odhalení i malých necelistvostí. Je možné také kontrolovat tělesa s netypickou a složitou geometrií, jako jsou ozubená kola. Princip těchto zkoušek spočívá v použití vhodné detekční kapaliny, která se nanese na povrch materiálu a tam pronikne do necelistvostí. Po odstranění přebytečné detekční kapaliny vzlíná zpět na povrch díky působení kapilárních sil. Tímto působením se povrchová vada zviditelní. Používají se detekční kapaliny s malým povrchovým napětím, které dobře smáčejí povrch.

Použité detekční kapaliny:

A) Zkoušky s použitím detekční kapaliny chemicky pasivní:

- zkoušky barevnou kapalinou;
- zkoušky fluorescenční kapalinou;
- ostatní (olej, petrolej);

B) Zkoušky s použitím detekční kapaliny chemicky aktivní.

4.1 Postup kapilární zkoušky [12]

Postup kapilární zkoušky je naznačen na obr. 1:

- A) Nejprve je zapotřebí vzorek důkladně odmastit. Na takto připravený materiál se nanesou (štětkem nebo nástřikem) detekční tekutina, která se na povrchu materiálu nechá působit po čas předepsaný výrobcem, aby dobře pronikla do pórů a trhlin. Minimální doba působení penetrační látky je pět minut.
- B) Po uplynutí doby potřebné pro proniknutí detekční tekutiny do vad se přebytečná tekutina odstraní pomocí opláchnutí nebo otření. Tato doba závisí na typu materiálu.
- C) Posledním krokem je nanesení vývojky, což je suspenze bílého pigmentu v těkavé látce. Vývojkou se na povrchu materiálu vytvoří tenká bílá porézní vrstva, která napo-

máhá ke vztlínání detekční kapaliny. Vrstva vývojky se nasytí detekční kapalinou a následně se zbarví (zčervená) nebo stopa vady fluoreskuje a pozoruje se v ultrafialovém záření. Pokud se používají chemicky aktivní látky, dochází k reakci mezi kapalinou a vrstvou pigmentu. Výsledkem reakce je barevná stopa.



Obrázek 1. - Schéma kapilární zkoušky. [20]

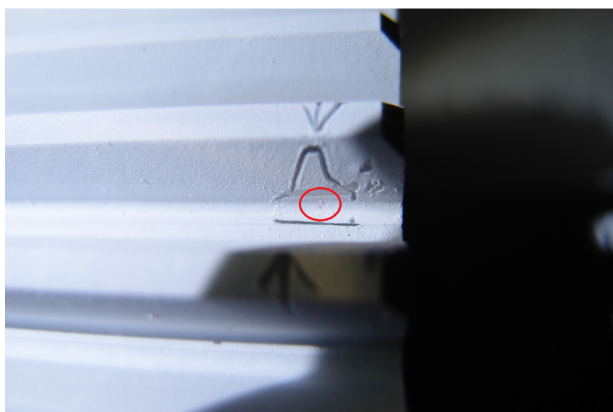
Při kapilární zkoušce se používají látky renomovaných výrobců, jako jsou například Helling, Diffu-Therm apod. Výhodou kapilárních zkoušek je jejich nenáročnost, jednoduchost a spolehlivost. V současné době jsou kapilární zkoušky velmi rozšířené ve strojírenství nejen ke kontrole ozubených kol, ale například i ke kontrole svarových spojů převodových skříní, závitů a dalších důležitých součástí.



Obrázek 2. - Nanesená detekční tekutina



Obrázek 3. - Výsledek kapilární zkoušky



Obrázek 4. - Kontrola svarů



Obrázek 5. - Kontrola svarů

5 Zkoušky ultrazvukem [1], [2], [12]

Ultrazvukem se rozumí kmitání částic o kmitočtu vyšším než 20 kHz. Zkoušky ultrazvukem využívají jeho odrazu na rozhraní dvou prostředí. Pro defektoskopické zkoušky mají hodnoty frekvence význam až do 1-25 MHz v laboratorních podmínkách. Libovolně zvolený kmitočet ultrazvuku není možný realizovat z toho důvodu, že velikost zrna musí být menší než vlnová délka ultrazvuku a vlnová délka vlnění musí být menší než detekovaná vada. Pokud by tato podmínka nebyla splněna, docházelo by k odrazům na hranici zrn a tím by se zeslabovala intenzita procházejícího svazku. Pomocí ultrazvuku se dá také realizovat měření tloušťky materiálu, elastických vlastností, pevnosti a vnitřního pnutí. Zjišťování vad materiálu pomocí ultrazvuku se provádí v případě, že jsou vady kolmé na směr vln ultrazvuku. Pokud kolmé nejsou, musí být použito speciální řešení. Abychom vlnu detekovali, musí být vada taková, aby na ní nastával odraz, a musí být větší než 10^{-0} mm. Pokud je vada menší, dochází k ohybu vln a vadu není možné zjistit. Ultrazvukové zkoušky umožňují snadnou a spolehlivou detekci plošných a rovinných vad rovnoběžných s povrchem materiálu. Nedestruktivní metodou se dají zkoušet ocelové materiály a materiály z lehkých slitin. Metoda je vhodná pro kontrolu ozubených kol, kdy se zkoumají vady (bubliny, póry, staženiny apod.) nacházející se uvnitř zubu, což nám kapilární zkouška neumožňuje.

5.1 Metody ultrazvukové defektoskopie [3], [2], [12]

Rozlišujeme základní ultrazvukové defektoskopické metody:

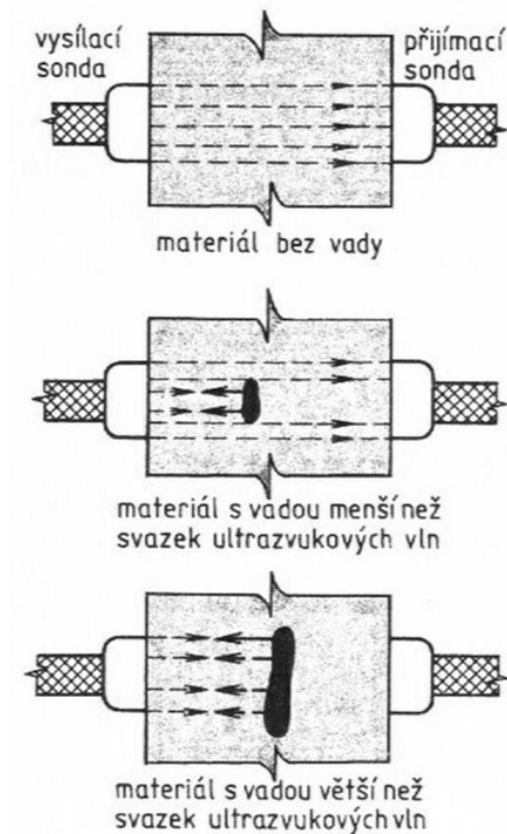
- A) Metoda průchodová;
- B) Metoda odrazová;
- C) Metoda rezonanční;
- D) Metoda vizuální.

5.1.1 Průchodová metoda

Průchodová metoda je založena na tom, že ultrazvuk se vysílá pomocí sondy do zkoušeného materiálu, prochází jím a zachycuje se přijímací sondou, viz obr. 6. Po průchodu ultrazvuku materiálem a zachycení na přijímací sondě se převádí na elektrické napětí, které registrujeme na přístroji. Zkoušku je možné provádět dvěma způsoby:

- A) Obě sondy jsou souose seřizeny a pohybuje se zkoušený materiál;
- B) Materiál je v klidu a sondami upevněnými k držáku se pohybuje po ploše vzorku.

Poloha vady je dána jejím vrhaným akustickým stínem. Vada se zjišťuje porovnáním hodnot přijaté energie materiálem porušeným a neporušeným. Vzhledem k tomu, že vady bývají malé, jsou malé i sondy, a to zhruba o průměru 20–30 mm. Pro zjištění vad je vhodné, aby povrch materiálu byl hladký a rovný. Pro kvalitnější průchod vln do materiálu je třeba nanést na povrch vazelínu nebo olej. Metoda je velmi rozšířená vzhledem k tomu, že se dá dobře automatizovat a s její pomocí se dají zkoušet různé druhy materiálů o různých tloušťkách. Její nevýhodou jsou ale nároky na seřízení sond a nutnost umožnění přístupu ke zkoušenému materiálu z obou stran. Z tohoto důvodu je kontrola ozubených kol průchodovou metodou nerealizovatelná.

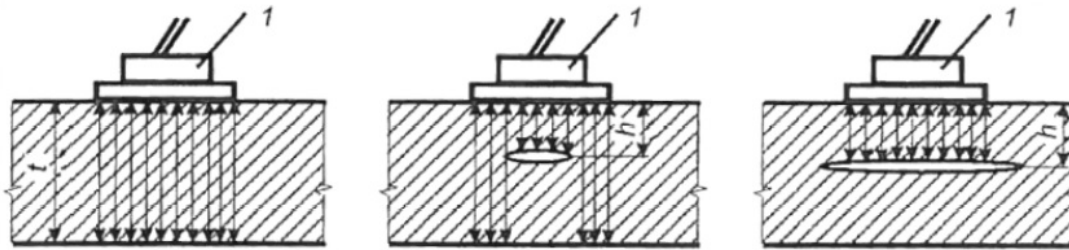


Obrázek 6. - Schéma průchodové metody. [21]

5.1.2 Odrazová metoda

Metoda spočívá v použití vysílací a odrazové sondy na jedné straně materiálu. Ultrazvuk vysílaný do materiálu se jím šíří, a pokud narazí na překážku, je odražen k přijímací sondě. Pokud se v materiálu nenachází žádná vada, ultrazvuk se odráží až z protilehlé stěny materiálu. Díky tomu, že rychlost ultrazvuku je konstantní, lze využít oscilograf a celý záznam zobrazit na monitoru. Použití jedné sondy je velkou výhodou při hledání vad v tlustých materiálech. Pomocí této metody se také dobře hledají vměstky.

Odrazová metoda je citlivější než metoda průchodová a dají se jí zjišťovat trhlinky ve struktuře. Používá se také pro kontrolu svarů a je vhodná i pro kontrolu ozubených kol.



Obrázek 7. - Schéma odrazové metody. [22]

5.1.3 Rezonanční metoda

Při použití této metody se do materiálů vysílá ultrazvuk a mění se jeho vlnění tak dlouho, až v materiálu vznikne stojaté vlnění. Díky známé frekvenci můžeme dopočítat sílu materiálu nebo polohu vady. Touto metodou se dají zjistit vady rovnoběžné s povrchem, jakost plechů. Dá se dobře automatizovat, ale není vhodná pro kontrolu ozubených kol vzhledem k složitým tvarům. Tato metoda se dnes již nepoužívá. Byla nahrazena efektivnější odrazovou metodou.

6 Zkoušky magnetické a elektrické

Zkoušky jsou založeny na magnetické a elektrické indukci. Těchto zkoušek se dá využít pro zjištění vad těsně pod povrchem i vad čistě povrchových.

Dělí se na:

- A) Magnetické;
- B) Indukční.

6.1 Zkoušky magnetické [2], [12]

Prášková magnetická metoda je jedna z nejčastěji používaných metod pro kontrolu povrchových vad na feromagnetických materiálech. Metoda umožňuje zjišťovat povrchové vady, jako jsou trhliny a praskliny související s povrchem. Změnou magnetického toku ve zmagnetizovaném materiálu je zjištěna vada, která je vidět zvýšením magnetického odporu, tím pádem v místě vady dochází k zakřivení siločar. Nejvíce rozptýlený magnetický tok je u vad, které vystupují na povrch, a rychle klesá se vzdáleností vad od povrchu. Pro identifikaci vad se používají:

- A) Suchý feromagnetický prášek (již není povolen);
- B) Detekční kapaliny, ve kterých je rozptýlen feromagnetický prášek.

Podmínkou pro provedení této zkoušky je zmagnetizování materiálu, které se po ukončení zkoušky musí odmagnetizovat. Odmagnetizování se obvykle provádí pomocí tunelových cívek.



Obrázek 8. - Zkouška magnetická NDT. [23]

6.2 Zkoušky indukční [2]

Tato metoda se používá pro plynulou kontrolu. S její pomocí se opět dají zjistit povrchové vady kruhových výrobků (trubky, tyče apod.). Využívá se v sériové a automatizované výrobě.

6.3 Indikace vad na základě rozptylového pole (metoda magnetická polévání)

Tato zkouška je vhodná pouze pro feromagnetické materiály a pracuje na stejném principu jako magnetická prášková metoda, kdy rozptylové pole je zjišťováno pomocí elektromagnetických snímačů pohybujících se nad povrchem zkoumaného materiálu.

6.4 Indikace vad pomocí vířivých proudů [16], [4]

Vířivé proudy byly objeveny v roce 1851 francouzským fyzikem Léonem Foucaultem. Ten zjistil, že pokud se bude vodič pohybovat v okolí magnetického indukčního toku, začnou se v tomto vodiči vytvářet indukované proudy, které mají charakter proudových smyček. Tyto cirkulující proudy vytvářejí v materiálu indukované magnetické pole, které tyto proudy vyvolalo. Tento jev formuloval německý fyzik Lenz Heinrich jako tzv. Lenzův zákon. Tento zákon se dá odvodit z Faradayova zákona elektromagnetické indukce.

$$\varepsilon_F(t) = \oint_C E \cdot dl = - \frac{d}{dt} \int_S B \cdot dS$$

Mínus ve vztahu nám označuje, že proud vytvořený elektromagnetickou indukcí je proti změně magnetického toku. Pokud by toto tvrzení bylo opačné, staly by se vířivé proudy zdrojem energie. Tento efekt ovšem způsobuje, že vířivé proudy generují odporové ztráty transformované na tepelnou energii. Tyto ztráty jsou závislé na frekvenci.

6.4.1 Principy a základní charakteristiky vířivých proudů [17], [18]

Vířivé proudové sondy jsou založeny na relativně jednoduchých principech a obvykle se skládají ze sestavy, která obsahuje jednu nebo více cívek ve vhodném uspořádání. Tvar cívky, její průřez, velikost a konfigurace jsou parametry, které je potřeba zvážit pro správné použití dané aplikace. Tyto cívky jsou napájeny střídavým proudem a známé frekvenci. Tyto parametry vedou k magnetickému poli, které je také různých typů. Pokud se cívka přiblíží ke zkoumanému vzorku, je zde indukováno napětí. Hustota vířivých proudů je největší na povrchu a klesá exponenciálně s hloubkou. Při rozdílném kmitočtu budícího pole snímače pronikají vířivé proudy do rozdílných hloubek. Zatímco stejnosměrný proud prochází vodičem v celém objemu, střídavý proud prochází povrchem, tzv. skin efekt. Při rostoucí frekvenci je hloubka penetrace nižší. O charakteru vady vypovídá amplituda a fáze.

6.4.2 Metody pro detekci vířivými proudy

Existují dvě metody pro indikaci vířivými proudy:

- A) Impedanční metoda;
- B) Odesílací přijímací metoda.

Impedanční metoda

V této metodě je hnací cívka pouze monitorována vzhledem k tomu, že změny napětí nebo proudu v ní nám pomohou zjistit významné parametry, které vedou ke změnám impedance. Výsledná impedance je dána součtem impedance cívky a impedance generované vířivými proudy v materiálu. Tato metoda využívá sledování úbytku napětí na zkušební cívce.

Odesílací a přijímací metoda

Metoda využívá indukované napětí na primární cívce, kde se měří. Využití této metody je dáno omezením teplotního driftu ve zkoumaném materiálu. Tok vířivých proudů je sledován účinkem přidružených elektromagnetických polí.

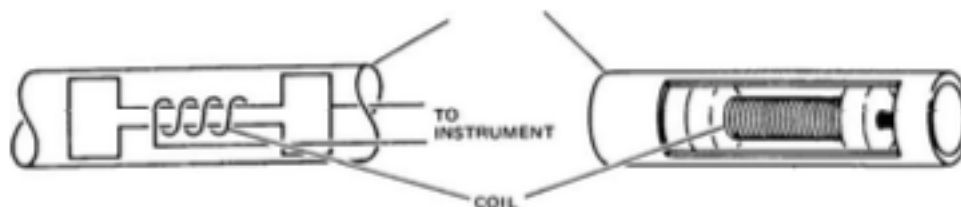
6.4.3 Typy sond

Sondy mohou mít různé varianty. Volba této sondy závisí na typu materiálu a jeho zkušebním stavu. Zde jsou uvedeny tři hlavní typy sond, které jsou běžně používány.

- A) Vnitřní sondy;
- B) Obklopující sondy;
- C) Povrchové sondy.

Vnitřní sondy

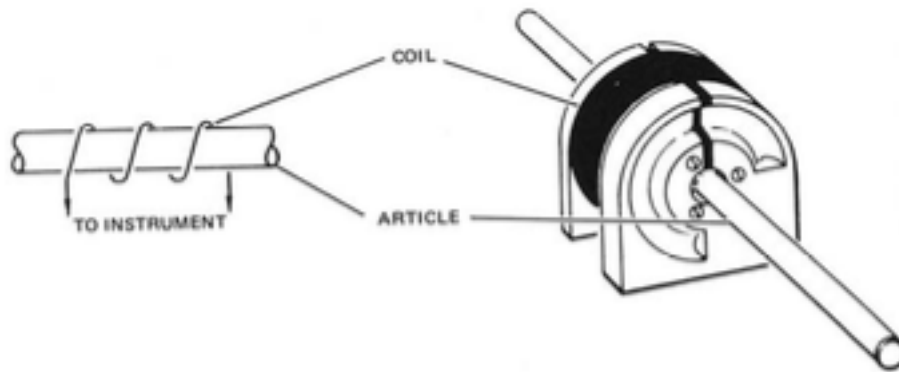
Vnitřní sondy jsou tvořeny z kruhových cívek používaných k testování trubek nebo kruhových otvorů. Na obr. 9 je znázorněna cívka, která může být použita pro tyto kontroly. Stejně jako obklopující cívka indukuje proudy, které obklopují celý obvod trubky, takže celá část obklopující cívky je kontrolována.



Obrázek 9. - Vnitřní sonda. [6]

Vnější sondy

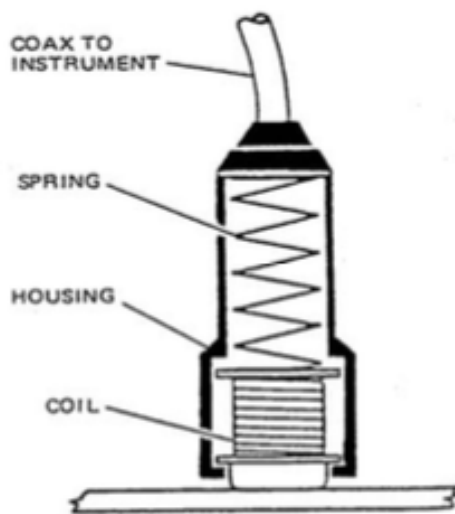
Tyto sondy mají podobnou strukturu jako sondy vnitřní pouze s tím rozdílem, že materiál prochází uvnitř cívky. Jsou primárně využívány pro kontrolu kruhových materiálů a vnějších ploch. Magnetické pole indukuje vířivé proudy, které obklopují celý obvod trubky nebo tyče. Šířka cívky je dána aplikací. Široké svitky pokrývají velké plochy, takže reagují na hromadné efekty, např. vodivost, zatímco úzké svitky reagují na podněty citlivěji. Sonda je znázorněna na obr. 10.



Obrázek 10. - Obklopující sonda. [6]

Povrchová sonda

Povrchové sondy jsou jedněmi z nejpoužívanějších typů sond. Vady detekované těmito sondami mohou být povrchové nebo těsně podpovrchové. Sondy mohou být ruční nebo se dají automatizovat. Cívka je na konci opatřena vrstvou epoxidu sloužícího k ochraně proti opotřebení.



Obrázek 11. - Povrchová sonda. [6]

7 Způsoby tepelného a chemicko-tepelného zpracování s ohledem na požadavky ozubených kol. [7]

Výkon ozubených kol je dán nejen správným výběrem materiálů pro výrobu, ale také vhodným tepelným a chemicko-tepelným zpracováním. Pro odolnost je také zapotřebí vybrat optimální postup a další úpravy povrchu.

7.1 Kalení a popouštění [7], [13]

Patří mezi nejzákladnější úpravu povrchu ozubených kol a jejich zušlechtnění. Jedná se o procesy kalení s následným popouštěním. Kalení je ohřev na teplotu austenitizace, výdrž na ní a rychlé ochlazení. Kalení není čistě povrchová úprava, ale tento proces výrazně ovlivní vlastnosti povrchu a celkové chování materiálu.

7.1.1 Ohřev [7]

Ozubená kola musí být před ohřevem zbavena vnitřního pnutí. Protože kola jsou vyrobena na hotovo, není přípustná žádná změna tvaru ani rozměru. Proto je nutné vhodně zvolit způsob a rychlost ohřevu, umístění výrobku v peci a ochranu jeho povrchu. Kola je zapotřebí ohřívat pozvolna, rovnoměrně. Pokud by byl vyšší teplotní gradient, mohlo by dojít k tvarové deformaci, a proto se ohřev uskutečňuje v několika etapách. Po dosažení kalicí teploty je nutná krátká prodleva na této teplotě. Pro uhlíkové oceli stačí 10 minut, pro legované asi 15 minut.

7.1.2 Ochlazování [7]

Výrobky jsou ochlazovány nadkritickou rychlostí na vzduchu, v oleji, solné lázni nebo ve vodě. Ochlazování závisí na chemickém složení oceli, prokalitelnosti, rozměrech a dalších parametrech. Důležitá je jen mírně nadkritická rychlost, jinak vznikají nadměrné deformace a velké vnitřní pnutí, které jsou nežádoucí. Musí být zajištěn dokonalý styk kola s chladicím médiem. Pokud je zapotřebí ozubená kola opakovaně kalit, je potřeba nejprve žihat naměkko, aby nedošlo ke zvýšení pnutí a deformaci.

7.1.3 Popouštění [8], [7]

Konečné vlastnosti materiálů po kalení, kdy jsou křehké, se získají popouštěním. Popouštění následuje okamžitě po kalení. Teplota popouštění se volí na základě požadovaných vlastností (tvrdost, pevnost, houževnatost, únavová pevnost). Při vyšších popouštěcích teplotách (500–600 °C) vlivem rozpadu zbytkového austenitu tvrdost stoupá. Při prvním popouštěcím cyklu

dochází k popouštění primárně vzniklého martenzitu a k precipitaci karbidů. Při chladnutí z této teploty dojde k rozpadu části zbytkového austenitu na martenzit. Proto se v některých případech popouštění opakuje až třikrát a vždy s nižší teplotou než předchozí proces. Při vícenásobném popouštění se volí prodleva na popouštěcí teplotě. Vhodné je proces popouštění zakončit stabilizačním popouštěním, jehož teplota je asi 30 °C pod teplotou posledního popouštění. Do oblasti sekundární tvrdosti se popouštějí i chromové ledeburické oceli pro práci za zvýšených teplot nebo které budou následně chemicko-tepelně zpracované.

7.2 Tepelně-chemické zpracování [7]

Chemicko-tepelné zpracování se liší od dalších úprav tím, že se mimo strukturních změn při něm mění i chemické složení povrchové vrstvy. Změnu chemického složení vyvolá sycení povrchu určitým prvkem a jeho difuze do kovu. Chemicko-tepelné zpracování může být i objemové, kdy se snižuje obsah některého prvku v celém objemu materiálu. Chemicko-tepelné zpracování se používá nejčastěji pro zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení, odolnosti proti cyklické námaze, korozi a dalším vlastnostem vhodným pro materiál. Chemicko-tepelné zpracování se provádí v prostředí s vysokou koncentrací daného prvku, které může být plynné, kapalně a pevné. Mezi nejmodernější metody patří metoda nitridace s použitím plazmatu.

7.3 Dělení metod tepelně-chemického zpracování [7]

Na povrchu součásti jsou záměrně vyvolány změny chemického složení, v některých případech kombinované i s fázovými a strukturními změnami povrchových oblastí. Vrstvy vznikají následujícími způsoby:

- A) Difuzí vhodných prvků do povrchové vrstvy materiálu při teplotách nad A_{c3} a následnou fázovou transformací zpracované oceli. Tvorba karbidických a nitridických fází je na škodu. Povrch je zpevněn díky vzniku vysokouhlíkového martenzitu (cementace a nitrocementace).
- B) Difuzí vhodného prvku do povrchové vrstvy materiálu při teplotách nad A_{c3} . Povrch je zpevněn vznikem tvrdých povrchových fází. V jádru oceli dochází k fázové transformaci (bórování).
- C) Difuzí vhodných prvků do povrchové vrstvy oceli bez následného tepelného zpracování. V jádru oceli nedochází k fázové transformaci. Povrch je zpevněn vznikem tvrdých fází ve vrstvě (nitridace a karbonitridace).

- D) Depoziční procesy, kdy se na povrch nanáší vrstva zcela odlišná svým chemickým složením od základního materiálu. Vzniklé vrstvy jsou velmi tvrdé a se substrátem jsou spojeny pouze tenkou difuzní vrstvou (několik μm protože nedochází k výraznému průniku daného prvku do substrátu.
- E) Další netradiční způsoby. Často používaná je metoda povrchového legování po předchozím natavení vysoce koncentrovaným energetickým zdrojem (laser, elektronový paprsek, plazma).

7.4 Druhy chemicko-tepelného zpracování [7]

Pomocí chemicko-tepelného zpracování se na povrchu materiálu vytvářejí vrstvy, které mají odlišné chemické vlastnosti a složení než základní materiál. Nejčastěji se používají metody, které mají za následek zlepšení povrchové tvrdosti, odolnosti proti otěru a zadírání. Toho se docíluje kombinací sycení povrchu uhlíkem, dusíkem, sírou nebo jejich kombinací.

7.4.1 Cementace [7], [9], [13]

Nejčastěji používaným postupem je sycení povrchu uhlíkem při teplotě nad A_{c3} . Účelem této operace je zvýšení koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě u nízkouhlíkových ocelí (obsah uhlíku do 0,3 %) podeutektoidní nebo slabě nadeutektoidní koncentrace. Vzniklá povrchová vrstva má vysokou tvrdost, vysokou ořezuvzdornost a zvýšenou odolnost proti únavě. Tloušťka cementované vrstvy je nejčastěji do 1 mm, ve výjimečných případech 2 a více milimetrů. Důvodem k vyhřátí materiálu nad křivku A_{c3} je, že jeho struktura je tvořena austenitem, ve kterém se uhlík rozpouští rychleji. Správně nauhličený povrch má mít obsah uhlíku 0,85 %. Vyšší obsah uhlíku v nacementované vrstvě má za následek vyloučení nadeutektoidních karbidů, které jsou nežádoucí tehdy, když jsou rozloženy na hranicích zrn, protože velmi snižují houževnatost cementované vrstvy. Její kvalita závisí na cementačním prostředí, cementační teplotě, výdrži na ní a na chemické složení cementovaného materiálu, především pak na obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků. Cementační prostředí lze rozdělit na pevné, kapalné a plynné. Cementování v sypkém prostředí (prášku) je nejstarší způsob, ale dnes není příliš častý kvůli přílišné zdlouhavosti operace. Kvůli nutnosti vyhřát materiál a velkou masu zásypu, který se skládá z dřevěného uhlí s přídavkem koksu a aktivátoru (nejčastěji BaCO_3), na cementační teplotu 880 až 920 °C, jsou i náklady na operaci vysoké. Nejčastější využití je v kusové výrobě, a to díky vlastnosti prostředí cementovat výrobek jakéhokoliv tvaru a velikosti.

Reakce:

- A) $2 \text{ C} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ CO}$;
- B) $2 \text{ CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$;
- C) $\text{BaCO}_3 + \text{C} \rightarrow \text{BaO} + 2 \text{ CO}$;
- D) $\text{BaO} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3$.

Cementace v kapalném prostředí se využívá zejména pro malé až střední výrobky, u kterých není požadavek na silnou cementační vrstvu. Tento způsob je sice velice rychlý, ale kvůli používání kyanidů je velice neekologický a pro složitou likvidaci pracovních látek nepoužívaný.

Reakce:

- A) $2 \text{ NaCN} + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ NaCNO}$;
- B) $4 \text{ NaCNO} \rightarrow 2 \text{ NaCN} + \text{Na}_2\text{CO}_3 + \text{CO} + 2 \text{ N}$.

Nejmodernější a dnes nejčastěji používaný způsob je cementace v plynném prostředí. Složení plynné atmosféry bývá 20 % CO, do 40 % N₂, do 40 % H₂, 0,4 % CO₂ a 3 až 15 % CH₄.

Teploty při cementaci se pohybují mezi 850 a 1050 °C. Tato teplota závisí především na druhu oceli, ale i na cementačním prostředí a velikosti výrobku. U většiny ocelí se pohybuje mezi 900 a 950 °C. U chrom – niklových ocelí je nižší a u ocelí, které nejsou náchylné na hrubnutí austenitického zrna, (CrMnTi) je 1000 až 1050 °C. Vyšší teplota podporuje difuzi, takže rychlost cementace roste. Vysoký koncentrační spád může mít za následek vyšší obsah uhlíku a tím vyloučení křehkého sekundárního cementitu, který vzniklou cementační vrstvu znehodnocuje.

Reakce:

- A) $2 \text{ CO} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{C}$;
- B) $\text{CO} + \text{H}_2 \text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$;
- C) $\text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO} + \text{H}_2$;
- D) $\text{CO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}_2$.

Pokud je potřeba proces urychlit, rozdělí se na dvě části. Při první etapě, sytící, se koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě zvýší až na 1,2 % a při následné etapě, difúzní, se sníží na požá-

dovaných 0,85 %. Doba cementace se může zkrátit vakuovým cementováním při tlaku 1 až 10 Pa. Nauhličuje se pomocí toku uhlovodíků (CH_4 , C_3H_8) 30 až 60 minut. Difúzní stádium, při němž se uhlovodíky evakuují z prostředí, trvá 10 až 20 minut. Kromě časové nenáročnosti je tato metoda ekologická, vyžaduje ale vyšší počáteční investice do zařízení. Další alternativou je cementace v doutnavém výboji. Mezi výrobkem (katodou) a anodou je potenciálový rozdíl několik kilovoltů. Uhlíkový potenciál v plazmatu je vysoký, takže postačí krátké nauhličující stádium (10 minut), následované difúzním stádiem (30 minut). Výhodou je mimořádná rovnoměrnost vrstvy a malá spotřeba plynu.

Cementované předměty je nutné tepelně zpracovat pro získání potřebné tvrdosti povrchu, pevnosti a houževnatosti jádra. Rozdílný obsah uhlíku má za následek nepříznivé rozložení vnitřního pnutí.

Nejjednodušší způsob tepelného zpracování představuje kalení přímo z cementační teploty. Tato teplota je pro nacementovanou vrstvu příliš vysoká a dlouhou výdrž na této teplotě hrubne austenitické zrno, takže výsledná struktura martenzitu má vysoký podíl nerovnovážné struktury zbytkového austenitu. Výrobek má kvůli vysokému rozdílu teplot vyšší vnitřní pnutí, což ovlivňuje únavovou pevnost, a výsledná vrstva je méně odolná a má menší tvrdost. Vhodnější způsob je kalení s přichlazením, kdy je kaleno z teplot nad A_{c1} , což sice nezjemní zrno, ale sníží vnitřní pnutí. Nejpoužívanějším postupem je kalení s podchlazením pod teplotu A_{c1} a následný ohřev nad tuto teplotu. Dojde k překrytí, takže výsledná struktura je jemnější. Vnitřní pnutí je též nižší. Další možnost je kalit po ochlazení na pokojovou teplotu a opětovném ohřátí nad A_{c3} (kalení na jádro), kdy je výsledkem houževnaté a pevné jádro. Pro cementační vrstvu je nejvhodnější kalit z teplot nad A_{c1} (kalení na vrstvu), ale jádro je podkaleno. Dále následuje popuštění při nízkých teplotách (150 až 220 °C) ke snížení vnitřního pnutí. Tvrdost vrstvy po cementaci by neměla klesnout pod 58 HRC. Výsledkem cementace uhlíkových ocelí ve vakuu je tvrdost 63 HRC. Největší tvrdost vrstvy je po nauhličování v plazmatu – 66 HRC. Pevnost a houževnatost jádra výrobku závisí na chemickém složení oceli, jejím tepelném zpracování, prokalitelnosti, tvaru a velikosti výrobku.

7.4.2 Nitridace [7], [9], [10], [13]

Nitridování je postup chemicko-tepelného zpracování, při němž se povrch předmětů obohacuje dusíkem. Při sycení povrchu dusíkem vznikají v tenké vrstvě tvrdé nitridy, které způsobují velkou tvrdost vrstvy bez dalšího tepelného zpracování. Protože nitridy jsou poměrně stálou sloučeninou, je povrchová tvrdost, získaná nitridováním, stálá téměř až do teploty 600 °C.

K nitridaci jsou vhodné oceli obsahující legury jako chrom, molybden, wolfram, vanad a hliník, protože tyto prvky jsou schopné vytvořit velmi tvrdé nitridy. Při delším setrvání na nitridační teplotě je však hliník příčinou křehnutí, což se dá kompenzovat přísadou molybdenu. Obecně ale hliník tvoří jemné a velmi tvrdé nitridy. Chrom a vanad zlepšují houževnatost jádra. Nikl zase zvyšuje houževnatost nitridované vrstvy. U uhlíkových ocelí po sloučení s uhlíkem mohou též vznikat tvrdé karbonitridy. Obsah uhlíku původní oceli by se měl pohybovat mezi 0,2 a 0,6 % z důvodu zachování pevnosti jádra. Tvarové změny výrobku jsou po nitridaci minimální, ale výrazně roste mez únavy.

Před samotnou nitridací je nutné k dosažení optimálních výsledných vlastností materiál zúšlechtit. Tento proces se uskutečňuje nad teplotou nitridace. Nejvhodnější výchozí strukturou k nitridaci je sorbit. Nevhodný je oduhlíčený povrch a ferit vyloučený po hranicích zrn. Příliš měkký podklad může způsobit prolomení tenké nitridované vrstvy. Před nitridací se musí povrch důkladně očistit a odmastit, případně jemně brousit.

Samotné nitridování probíhá v plynném prostředí, v solné lázni nebo existuje také iontové nitridování.

Nejčastěji se používá plynné prostředí, které je tvořeno obvykle technickým čpavkem nebo směsí čpavku s dusíkem. Teploty se pohybují mezi 500 a 570 °C podle požadavku na tvrdost vrstvy. Proces nitridace se skládá z tepelného a chemického procesu. Chemický proces je výrazně ovlivněn stupněm disociace (množství zplodin rozkladu dusíku a vodíku v celkovém objemu zkoušené atmosféry), který se volí podle teploty. Pokud je stupeň disociace nízký, dochází k přesycení povrchu dusíkem a vzniká silná nitridační vrstva. Příliš vysoký stupeň disociace nedává možnost vzniku vrstvy. Nitridační doba v plynné atmosféře je 48 hodin na vrstvu silnou 0,4 mm. Nitridace v ultrazvuku může urychlit proces až 1,5krát.

Tvrdost nitridované vrstvy je až 1300 HV. Vlastnosti jádra lze upravit dalším tepelným zpracováním (marstressing). Při výdrži na nitridační teplotě dochází k poklesu jeho pevnosti. Následným kalením nitridovaného výrobku dojde ke vzniku velkých vnitřních pnutí v povrchových vrstvách, která zvyšují otěruvzdornost a odolnost proti únavě. Obecně ale platí, že po nitridování žádné tepelné zpracování nenásleduje. Nitridování je při výrobě ozubených kol velice rozšířený způsob jejich povrchové úpravy. Nevýhodou ale je, že vrstva povrchová je tenká a loupe se.

7.4.3 Nitrocementace [7], [9], [13]

Jedná se o sycení povrchu výrobku uhlíkem a dusíkem při teplotách nižších než cementačních, ale nad A_{c3} (840 – 860 °C), tedy dusík a uhlík se rozpouští v austenitu. Vrstva se tedy tvoří současně difuzí dusíku a uhlíku v austenitu.

Tyto vrstvy jsou obdobou vrstev cementovaných. Dusík ale podporuje difuzi uhlíku, takže je potřebná teplota nižší než u cementace. Celý proces je kratší a ekonomičtější než cementace. Deformace vlivem tepla jsou nižší, a proto je tento způsob vhodný i pro oceli, které jsou náchylné na hrubnutí zrna při austenitizaci. Prokalitelnost je díky dusíku oproti cementačním vrstvám vyšší.

Prostředí pro nitrocementaci je plynné a doba procesu je pro nástroje asi 10 až 20 minut. Po operaci je potřeba výrobek kalit (kalení může být přímo z nitrocementační teploty) a následně popouštět při teplotě kolem 150 °C. Výsledná ochlazená struktura obsahuje zbytkový austenit v takovém množství, aby byla zaručena požadovaná tvrdost, která je dána nitridy a martenzitem. Austenit však zvyšuje únavovou pevnost, plasticitu a rázovou houževnatost. Jako optimální tloušťka vrstvy je považováno 0,25 až 0,5 mm. Podobné vlastnosti a struktura jako u nitrocementace vznikne při nitridaci uhlíkových ocelí.

7.4.4 Karbonitridace [7], [9]

Podstatou tohoto procesu je sycení povrchu oceli uhlíkem a dusíkem při teplotách pod A_{c1} (většinou 560 – 620 °C). Na povrchu se vytváří tenká bílá vrstvička s tvrdostí až 1000 HM, která je dána oxikarbonitridem, a s tloušťkou 10 – 50 μm . Vrstva je odolná vůči otěru a zadírání. Pod bílou vrstvou je tzv. difúzní vrstva o tloušťce asi 1 mm a tvrdosti 300 až 400 HV, kde dusík proniká do feritu. Difúzní vrstva zvyšuje únavovou pevnost a zlepšuje vlastnosti vrstvy. Mez únavy se zároveň zvyšuje ochlazováním do oleje. Chlazení v oleji je nutné při teplotách karbonitridace nad 590 °C (eutektoidní teplota v diagramu Fe-N). Proces je možno provádět v prostředí pevném (kyanid + aktivátor), v solné lázni nebo v plynném prostředí. Dnes je nejvíce využíváno plynné prostředí (není potřeba jedovatého kyanidu).

Výhodou karbonitridování je rychlost operace (2 až 4 hodiny). Nárůst rozměrů je velice malý a deformace výrobků jsou zanedbatelné. Další výhodou je, že není nutné následné tepelné zpracování výrobku.

7.5 Pnutí a deformace při tepelném zpracování s ohledem na ozubená kola

7.5.1 Základní pojmy deformací [9], [6]

V celé technologické praxi se setkáváme s řadou případů, kdy ve výrobku vznikají vnitřní napětí-pnutí, někdy tak značná, že může dojít ke vzniku mikrotrhlin. Je-li úroveň pnutí srovnatelná s pevností hrozí porušení celého výrobku. Vedle tepelného chemicko-tepelného zpracování jde i o důsledky intenzivního tváření za studena, hrubovacích, ale i dokončovacích metod obrábění, svařování, pájení, odlévání, povlakování kovy, plasty a zejména keramikou.

Z hlediska časového působení vnitřních pnutí rozeznáváme:

- A) Dočasná vnitřní pnutí;
- B) Zbytková vnitřní pnutí.

Dočasná vnitřní pnutí působí, dokud trvá příčina, která je vyvolala. Touto příčinou nejčastěji bývá nerovnoměrné teplotní pole mezi povrchovými a vnitřními partiemi výrobku. Poté pružná deformace vzniklá lokální rozdílnou dilatací vytváří dočasné vnitřní napětí, které trvá, pokud se nevyrovnají teploty v celém objemu výrobku. Stejně dočasný charakter může mít i vnitřní pnutí vznikající během ohřevu nebo ochlazování kovu, ve kterém dochází k nehomogenní deformaci z důvodu nerovnoměrného průběhu fázové transformace. Pokud i po odstranění vnějšího impulsu (externí silové působení či nemechanická příčina) část vnitřních pnutí ve výrobku přetrvává, hovoříme o zbytkových napětích či pnutích. Zbytkové pnutí je tedy jedním z mnoha druhů vnitřních pnutí, vznikajících v důsledku nehomogenní deformace a můžeme je obecně definovat jako vícesé napětí, působící ve výrobku po velmi dlouhou dobu, přestože všechny jeho části mají stejnou teplotu a na výrobek již nepůsobí žádné vnější síly.

Tepelná zbytková pnutí - vyvolaná různými teplotními gradienty uvnitř výrobku či rozdílnými teplotními koeficienty roztažnosti jednotlivých částí výrobku nebo strukturálních složek.

Deformační zbytková pnutí - např. obráběním jsou povrchové vrstvy deformovány intenzivněji než vnitřní části výrobku. Po odstranění vnějších tlakových sil vzniká na povrchu tahové a uvnitř tlakové pnutí.

Strukturální zbytková pnutí - nehomogenní strukturální transformace je doprovázena objemovými změnami (např. transformace austenitu na ferit nebo objemově rozdílnější transformace

austenitu na martenzit). Co je společnou podstatou všech pnutí, je zřejmé z Hookeova zákona: $\sigma = E \cdot \varepsilon$.

Úroveň pnutí je určována velikostí elastické deformace vyvolané objemovými změnami ve výrobku. Pojem vnitřního pnutí tedy plně odpovídá pojmu vnitřní elastické deformace, neboť ona tento jev zcela kontroluje. Dále je pak pnutí funkcí modulu pružnosti E.

Vnitřní pnutí se obvykle rozdělují podle velikosti objemů, v nichž působí na:

A) Pnutí I. druhu - mikropnutí

Zasahují celý objem výrobku a jejich orientace je určena především jeho geometrií. Vznikají jako důsledek výrobních operací. Například hrubování nevyžíhaného odlitku odstraní povrchovou vrstvu, stav napjatosti se změní a výrobek se deformuje. Vznikají v každém ohříváném nebo ochlazovaném výrobku (bez ohledu na průběh fázových přeměn) v důsledku nerovnoměrnosti jak vnějšího, tak i vnitřního přenosu tepla. U plastických ocelí se toto makropnutí snižuje postupnou plastickou deformací. Tento proces se označuje jako relaxace.

B) Pnutí II. druhu - mikropnutí

Působí v oblastech srovnatelných s velikostí zrna nebo několika subzrn. Vznikají fázovou transformací nebo deformací kovu, když různá zrna či subzrna vykazují rozdílné elastické napěťové stavy. Orientace těchto pnutí se neváže ke geometrii výrobku. V celém objemu se pnutí II. druhu mohou vzájemně vyrovnat. Někdy se označují jako homogenní mikroskopická pnutí.

C) Pnutí III. druhu - submikroskopická

Také tato pnutí nemají žádný vztah k tvaru výrobku. Zasahují nepatrné objemy řádově velikosti elementární buňky krystalové mřížky. Tato nehomogenní pnutí jsou důsledkem elastické distorze mřížky při rozměrech od zlomku nanometru do hodnoty mřížkového parametru. Charakteristickými příklady jsou bodové mřížkové poruchy (vakance, intersticiální nebo substituční atomy). Také napjatost vyvolaná hranovou dislokací či koherentním rozhraním matrice a vyloučeného precipitátu způsobuje submikroskopická pnutí.

U reálných výrobků se neseťkáváme s výše uvedenými druhy pnutí jednotlivě. Obecně vzniklá vnitřní napjatost je výsledkem *superpozice pnutí I. až III. druhu*. Pnutí jednotlivých druhů se vzájemně ovlivňují. Např. nárůst mikropnutí může vést až ke vzniku makropnutí.

7.5.2 Deformace při tepelném zpracování [9]

Změny tvaru a rozměru výrobku jsou průvodními jevy při tepelném zpracování. Ve své podstatě se jedná o jevy negativní, ale nelze je zcela odstranit, pouze eliminovat. Tyto vady se dají rozdělit do skupin na:

- A) Změny objemové;
- B) Změny tvaru.

Objemové změny jsou víceméně zákonité, jsou vyvolány zvětšením nebo zmenšením objemu v důsledku fázových změn. Z měrných objemů strukturních složek je zřejmé, že austenitizace je spojena s objemovým smrštěním, zatímco martenzitická přeměna s objemovým nárůstem. Velikost rozměrových změn tedy souvisí s obsahem uhlíku v martenzitu (s jeho rostoucím obsahem rozměrové změny vzrůstají) a s podílem zbytkového austenitu po kalení (s rostoucím obsahem jsou objemové přírůstky menší). Přírůstek rozměrů po kalení se zmenšuje popo-
uštěním. U vysokolegovaných ocelí (vykazujících sekundární tvrdost) může dojít k dalšímu zvětšení rozměrů vlivem rozpadu zbytkového austenitu. Důsledky objemových změn možno částečně kompenzovat vhodně volenými přísadkami před tepelným zpracováním.

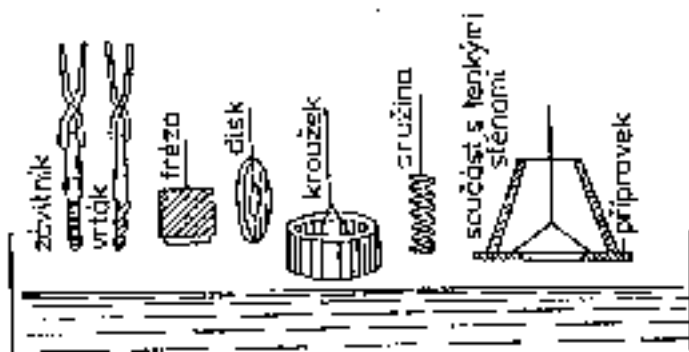
Tvarové změny působí mnohem větší potíže. Jsou způsobeny nerovnoměrným rozložením tepelných a transformačních pnutí. Velikost změny geometrického tvaru a její výskyt je ovlivněn řadou faktorů od samotného návrhu až po tepelné zpracování. Výskyt deformací je vnějším projevem rozložení a velikosti pnutí. Nejedná se pouze o pnutí tepelná a strukturní, ale na úroveň deformací po tepelném zpracování působí i zbytková pnutí ve výrobku před vlastním zpracováním, způsobená například tvářecí texturou, různým stupněm zpevnění povrchu při třískovém obrábění. Je tedy snahou tato vstupní pnutí před tepelným zpracováním odstranit použitím žíhání. Eliminace změn tvaru je velmi náročná jednak z hlediska odhadu jejich velikosti a umístění, jednak tkví v problematice odstraňování.

K největším tvarovým změnám dochází samozřejmě při uplatnění nejvyšších strukturních změn i nejvyšších rychlostí ochlazování. Podobně jako při ohřevu (kap. 2.5) závisí v kalených výrobcích vnitřní pnutí a tím i deformace především na:

- druhu a vlastnostech oceli;
- podmínkách austenitizace;
- podmínkách kalení;

- velikosti a tvaru výrobku.

Vnitřní pnutí u oceli je tím větší, čím je menší tepelná vodivost, čím je větší tepelná roztažnost, čím je menší prokalitelnost, tvárnost a čím jsou větší objemové změny při tvoření martenzitu. Vnitřní pnutí jsou tím větší, čím byla nedokonalejší austenitizace a prohřátí výrobku. Vyrůstá, zvětšuje-li se rozdíl teplot mezi kalenou součástí a kalicím prostředím a zvyšuje-li se rychlost ochlazování v kalicím prostředí. Vliv má na sám způsob kalení a je zapotřebí dodržet předepsané zásady viz obr. 9.

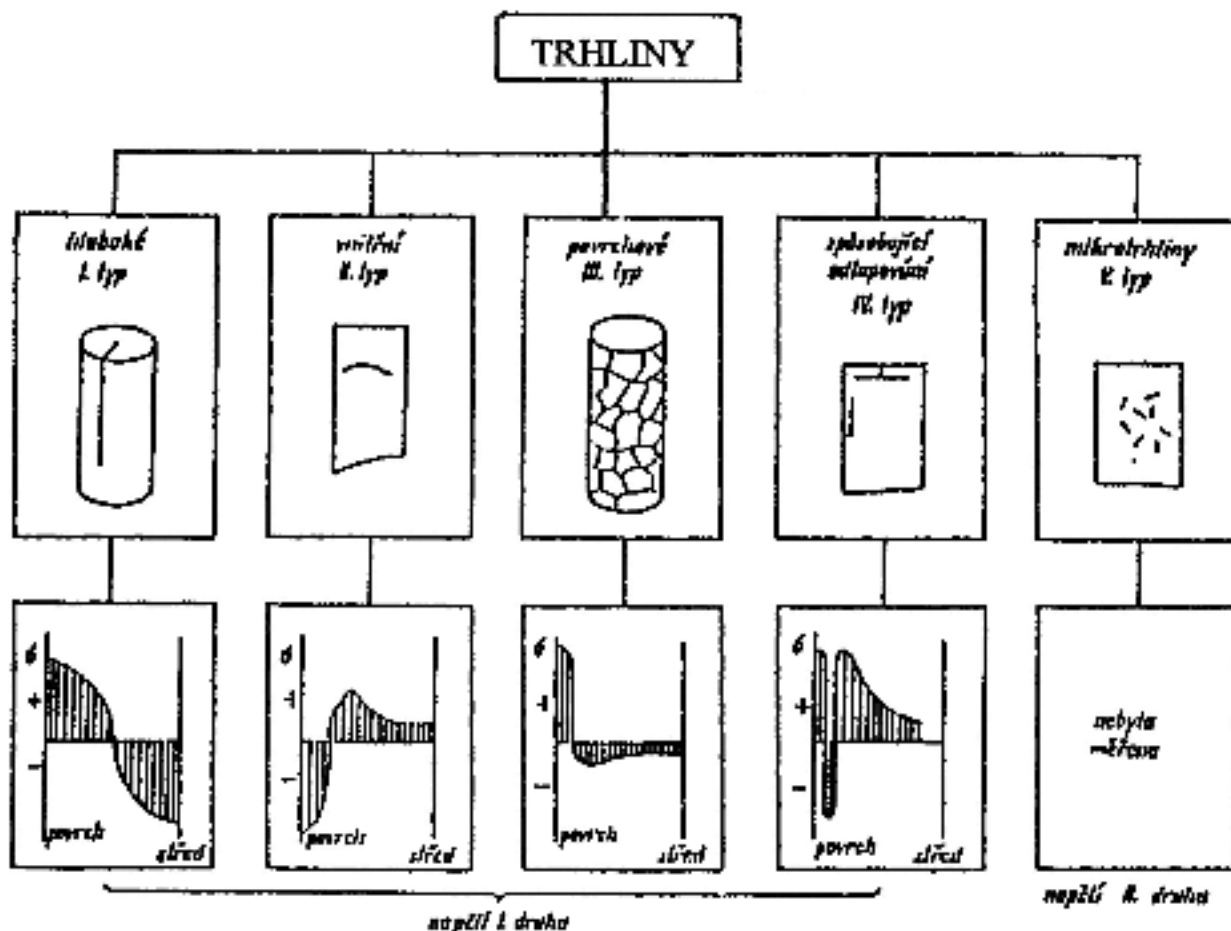


Obrázek 12. - Příklady způsobu ponořování výrobků do kalicí lázně. [9]

7.5.3 Trhliny při tepelném zpracování

Následkem vysokých vnitřních pnutí při tepelném zpracování nemusí docházet jen k přímým nebo následným (po zatížení v provozu nebo odebrání určité vrstvy) deformacím. Převyší-li výše pnutí kohezní pevnost nejslabšího místa součásti, vznikne trhlina. Vznik trhlin podporují jak povrchové, tak vnitřní vady. Ke vzniku trhlin může docházet jak na povrchu, tak i pod povrchem tepelně zpracovávaného výrobku.

Jelikož tepelné zpracování se často provádí jako jedna z konečných operací výrobku, vznik trhliny pak znamená nejen znehodnocení vlastního materiálu, ale i energie a práce vložených v předcházejících etapách. I když základním předpokladem pro zabránění vzniku trhlin je správná volba a dodržování technologického postupu, mohou být jejich příčinou i chyby zděděné z předcházejících etap výroby (záměna materiálu, skryté a strukturální vady, konstrukční nedostatky apod.). Podle charakteru rozložení napětí podél průřezu součástí obvykle rozlišujeme pět základních vad.



Obrázek 13. - Typy trhlin vznikající při tepelném zpracování ocelových výrobků. [9]

Uvedené rozdělení trhlin nezahrnuje trhliny, jejichž průběh je ovlivněn změnami průřezu a vruby. Vruby zvětšují náchylnost výrobku ke vzniku trhlin, ale nemění charakteristický vliv technologických a metalurgických ukazatelů na vznik trhlin předchozích typů. Trhliny vzniklé při ohřevu na teplotu kalení se objevují zvláště u rychlořezných ocelí, a to pro jejich nízkou tepelnou vodivost. Trhliny jsou přímé, sledují hranice zrn uspořádané v jedinou frontu. Povrch trhliny je oxidován. Trhlina protíná karbidické řádky. Kdyby nedocházelo ke strukturním přeměnám vlivem gradientu teploty, musela by na povrchu existovat tlaková pnutí.

Trhliny při popouštění mohou vznikat prudkým ohřevem zakalených součástí, jedná se o trhliny III. a IV. typu. Do této skupiny patří i trhliny vznikající nesprávným broušením (velký úběr, zanesený kotouč, nedostatečné chlazení).

8 Zadávající společnost MKV ozubená kola s.r.o. [14], [15]

Výroba ozubených kol se v Plzni datuje od roku 1908 ve Škodových závodech. V roce 1990 pracuje v tomto oboru již více než 370 technických a výrobních zaměstnanců.

Sídlo společnosti se nachází v Plzni. Díky vysoké odbornosti jednatele společnosti se firma MKV ozubená kola s. r. o. stává přední společností v oboru převodovek, a to jak standardizovaných, tak atypických strojů. Firma se specializuje na výrobu a konstrukci mechanických převodovek včetně výroby náhradních dílů. Společnost MKV ozubená kola s. r. o. také zajišťuje servisně-montážní služby. Při realizaci svých zakázek firma spolupracuje jak s tuzemskými dodavateli (Žďas, Škoda Plzeň, Vítkovice), tak i s dodavateli ze zahraničí. Firma provádí montážní práce dílů i celých převodovek.

Obory, ve kterých se můžeme setkat s produkty firmy MKV:

- těžební průmysl a doprava materiálu;
- pohony v cementárnách;
- pohony ve válcovnách;
- gumárenský průmysl;
- cukrovary;
- všeobecné strojírenství.

Společnost zavedla a používá systém managementu kvality v oboru vývoj, konstrukce a výroba ozubených kol a mechanických převodovek včetně dodávek náhradních dílů a zajišťování servisně-montážních služeb dle normy ČSN EN ISO 9001:2009. Firma disponuje velkým množstvím hotových projektů a díky pružnému přístupu k potřebám zákazníka nachází uplatnění u stávajících strategických partnerů. Poskytuje odborné poradenství v oblasti průmyslových převodovek a ozubených kol.



Obrázek 14. - Logo MKV ozubená kola s. r. o.

9 Návrh experimentálního programu

Praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem a zhotovením návrhu pro hodnocení kvality a velikosti chemicko-tepelného zpracování u ozubených kol pomocí nedestruktivního zkoušení. Tento experiment se bude provádět podle zadání firmy MKV ozubená kola s. r. o., která požadovala navrhnout a zhotovit jednoduché testování dodaných výrobků od subdodavatelů. MKV ozubená kola pro tento experiment dodala vzorky. Vzhledem k tomu, že není zapotřebí hodnocení trhlin a vad, ale hloubky chemicko-tepelného zpracování, zabývá se tento experimentální návrh pouze metodou vířivých proudů.

Experiment byl prováděn na materiálu 18CrNiMo7-6, který se běžně používá pro výrobu ozubených převodů a vysoce namáhaných součástí. Tato práce se bude nejdříve věnovat kontrole chemického složení materiálu podle dodaného protokolu a následného porovnání. Dále bude navrhovat postup pro kontrolu chemicko-tepelného zpracování pomocí vířivých proudů a porovnání hloubky chemicko-tepelného zpracování.

Na vzorcích bude provedeno porovnání dodaného materiálu s materiálem žíhaným naměkko. Toto porovnání se bude realizovat prostřednictvím měření tvrdosti materiálu. Dále budou provedeny metalografické zkoušky a hodnocení struktury materiálu.

Po provedení porovnání materiálu následuje výroba etalonů pro návržení technologických postupů pro nedestruktivní testování hloubky chemicko-tepelného zpracování. Tyto etalony se nejprve nacementují a následně zakalí. Cementační teplota bude konstantní a měnit se bude jen doba prodlevy na cementační teplotě. Tím získáme řadu vzorků o různých vlastnostech pro kontrolu různými metodami NDT. Primárně se budeme zabývat měřením hloubky CHTZ pomocí metody vířivých proudů, neboť tato metoda se běžně nepoužívá v praxi, takže není využit její obrovský potenciál.

Celá práce byla navrhována pro nedestruktivní kontroly chemicko-tepelného zpracování u ozubených kol a usnadnění těchto kontrol.

9.1 Porovnání materiálu a metalografické zkoušky

9.1.1 Dodaný materiál

Dodaný materiál nám popisuje protokol o materiálu.

B01, B09-B11 Spezification der Produkt/ Masse / Toleranz Product description / Dimensions / Tolerance		B02, B04 Stahlbezeichnung / Lieferzustand Steel designation / Deliv. state		B03 Materialnorm Classification standard		B03 Massnorm Dimensional standard					
Rundstahl 18CrNiMo7-6 HH+FP 40 mm 6,000 m		18CrNiMo7-6 HH+FP		EN 10084:2008 LVL 18Cr/ 01.07.2015 Rev.20		EN 10060					
A11 Wagen Nr. Wagon No.	A13 Lieferschein Nr. Delivery note	B07 Schmelze Heat No.	B08 Ringen / Stück Coils / Pieces	B08 Krbd Crbd	B13 Gewicht (kg) Weight (kgs)						
SWD09828 SWD9PK6	15/12/000725/01 03.12.2015	T33909	0	2	5960						
B07, B14, C70 Schmelze / Herstellungsjahr / Stahlherstellung. Heat No. / Year of production / Steelmaking process		C71-C92 Chemische Zusammensetzung-Chemical composition [%]									
T33909/2015 BO-Strangguss		C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Al	O
		0.17	0.54	0.27	0.012	0.005	0.03	1.58	1.48	0.029	0.0007
		H	N	Mo	V	Ti	Sn	Sb	Ca	Nb	
		1.00 ppm	0.0094	0.331	0.005	0.0017	0.003	0.002	0.0009	0.003	
Mechanische Werte-Mechanical values											
B07 Schmelze Heat No.	B05 Probzustand Test state	C11 Streckgrenze Yield point Re (MPa)	C12 Zugfestigkeit Tensile strength Rm (MPa)	C13 Bruchdehnung Elongation A5 [%]	C14 Bruchdehnung Contraction Z [%]	B05 Probzustand Test state	C03 Prüftemperatur Test temperature	C40, C42 Schlagarbeit Energy of impact KV [J] / KCV [J/cm2]			
T33909	+Q+T	885	1201	13,0	63,0	+Q+T	+20 °C	90,4 113,0			
		851	1219	12,3	49,8			92,9 116,1			
								87,7 109,6			
B07 Schmelze Heat No.	D56 Stampfproben Heading tests (EN 10263-1)	D57 Entkohlen Decarburization (max. / mm)	C54 Reinheitsgrad Micropurify (DIN 50602)		C57 Korngröße Grain size (ASTM E 112)	C30 Härte HB Hardness HB	C93 Vakuumentgasung Vacuum degassing				
T33909			S O S+O		8	185 - 207	ja				
B07 Schmelze Heat No.	D53 Verwechselprüfung 100% Sparking test 100%		D02 US Prüfung US test			D03 Restmagnetismus Residual magnetism					
T33909	entspricht		100% EN 10308/4			5,7 A/cm					

Obrázek 15. - Materiálový protokol

9.1.2 Porovnání tvrdostí materiálu dodaného a žíhaného naměkko

Měření tvrdosti bylo prováděno podle metody Brinella na Brinellově tvrdoměru. U této zkoušky se jako indentor používá ocelová kulička o normalizovaných průměrech 1; 2,5; 5;10 mm, která se zatlačuje do zkoušeného materiálu silou F. Po uvolnění této síly zůstává v materiálu vtisk, u něhož se změří dva na sebe kolmé průměry, z nich se vypočítá střední průměr. Zatížení se volí tak, aby vtisk byl 0,24 D do 0,60 D.

Doba působení zatěžovací síly je 10–15 s. U materiálů, které jsou měkčí, je doba zatěžování menší.

Nevýhodou této zkoušky je, že vtisk není souměrný a měření není stoprocentní.

Materiál	Zpracování	Metoda	1	2	3	4
18CrNiMo7-6	Dodaný stav	HB	4,707	4,721	4,681	4,688
18CrNiMo7-6	Žíhaný	HB	3,493	3,473	3,530	3,502

Tabulka 1. - Tabulka naměřených hodnot vtisků

Materiál	Metoda	1	2	3	4	Průměrná tvrdost
18CrNiMo7-6	HB	163	162	164	164	163
18CrNiMo7-6	HB	304	307	297	302	303

Tabulka 2.- Tabulka vypočtených hodnot vtisků

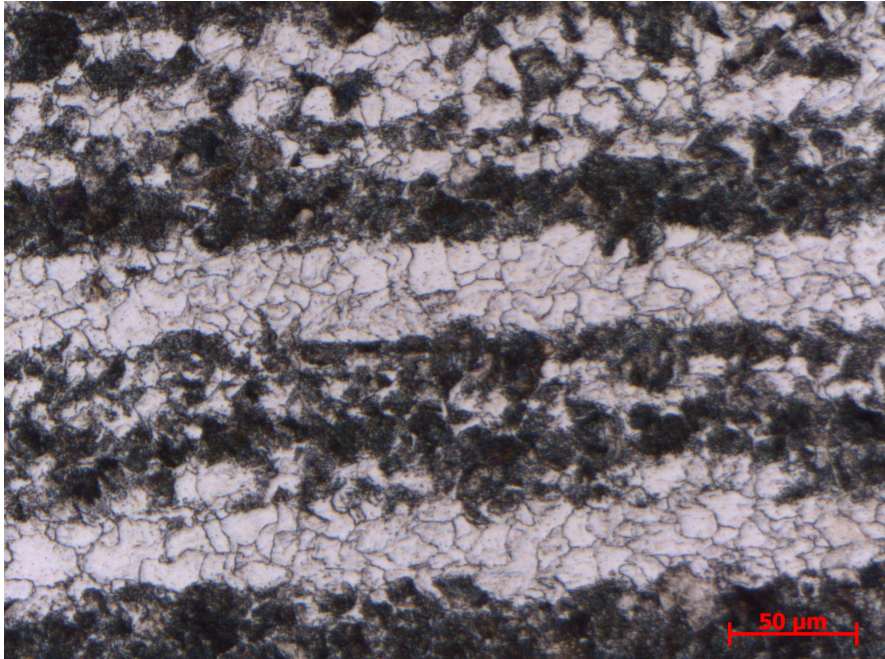
Vyhodnocování průměru vtisků se provádělo pomocí programu AxioVision, s nímž lze změřit dva na sebe kolmé průměry.

Podle tabulky vypočtených hodnot, kde jsou jednotlivé tvrdosti materiálu, lze konstatovat že, při žíhání byly dodrženy technologické postupy, ale materiál se samovolně zakalil. Tím se změnila i struktura materiálu, ale tomu se nedá zabránit.

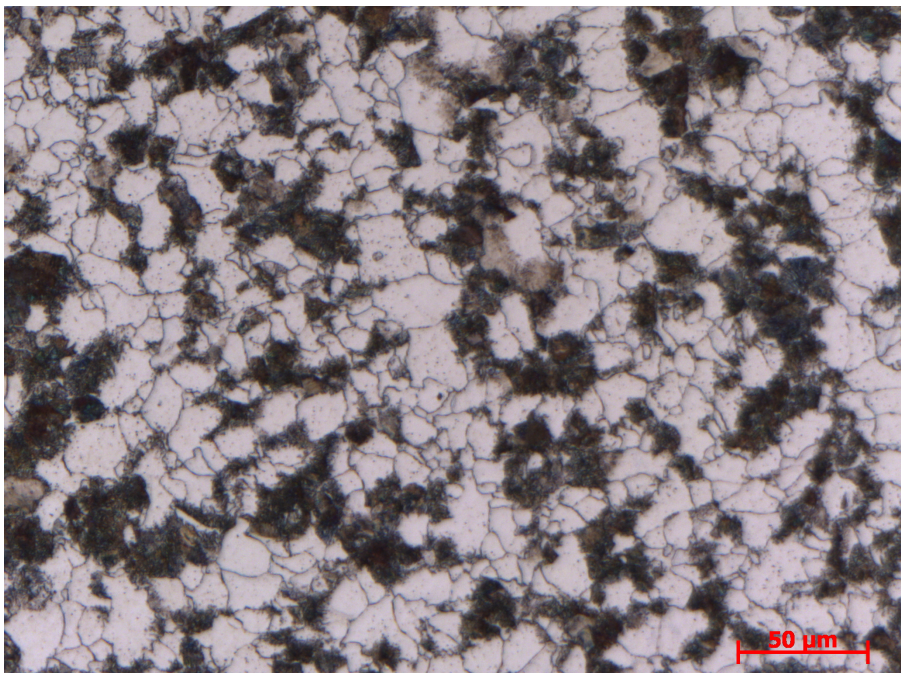
9.1.3 Metalografické zkoušky u dodaného a žíhaného materiálu

Metalografické zkoušky jsme prováděli za účelem porovnání a hodnocení kvality zrn materiálu a jejich uskupení.

Materiál dodaný nežíhaný: Jedná se o materiál 18CrNiMo7-6, jehož struktura je feriticko-perlitická. Materiál je řádkovitý. Tento stav je dán technologickými postupy při výrobě. Řádkování vzniká válcováním oceli a segregací legujících prvků. Tato struktura je vidět na obr. 16. Je v ní dále vidět globulární cementit. U této struktury je patrné, že se perlit vylučuje po hranicích primárních austenitických zrn. To je vidět na obr. 17.

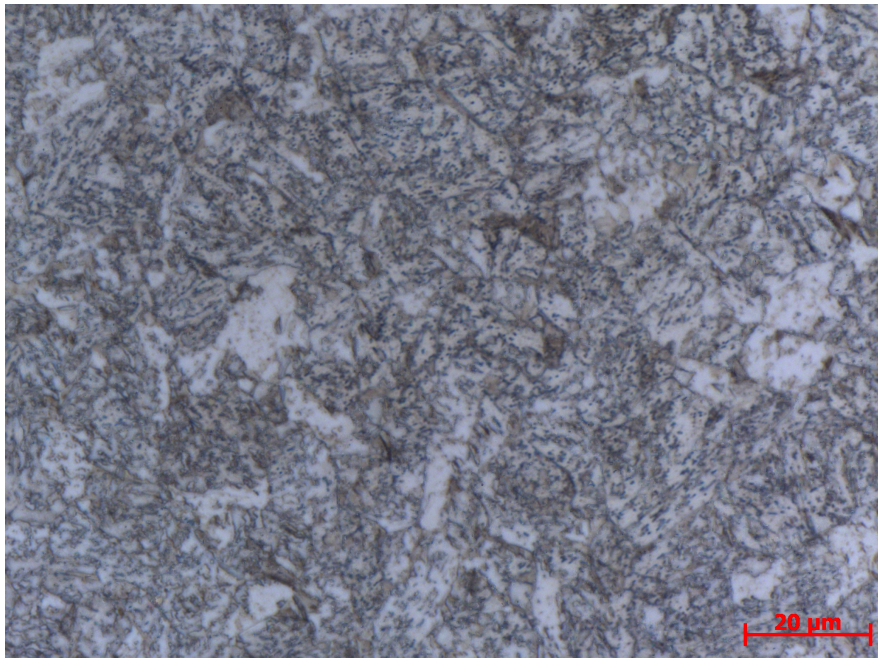


Obrázek 16. - 18CrNiMo7-6 podélný řez nežíhaného (dodaného) materiálu, zvětšení 200x



Obrázek 17. - 18CrNiMo7-6 příčný řez dodaného materiálu, zvětšení 200x

Materiál žíhaný naměkko: Po tomto tepelném zpracování dochází ke změně struktury, v níž se nachází ferit s útvary martenzitu zjemňující a zrovnoměrnující zrna. Díky martenzitu je i materiál odolnější proti vnikajícím tělesům. To vychází z tvrdosti materiálu. Viz obr. 18.



Obrázek 18. - 18CrNiMo7-6 podélný řez žíhaného materiálu, zvětšení 500x

9.2 Výroba vzorků pro zkoušky chemicko-tepelného zpracování

Výroba vzorků byla prováděna z tyčového materiálu o průměru 35 mm. Následným chemicko-tepelným zpracováním docílíme požadovaných vlastností. Chemicko-tepelné zpracování se bude skládat z cementování, kalení a následného popouštění.

9.2.1 Cementování vzorků [19]

Cementování vzorků budeme provádět při teplotě 910 °C. Tato cementační teplota patří mezi vyšší. Hloubka cementační vrstvy bude ovlivněna časem setrvání na teplotě cementace. Proto volíme pět časových hodnot v rozmezí od 3 hodin do 12 hodin. Vzhledem k nízkým provozním nákladům je zvolena prášková metoda cementace.

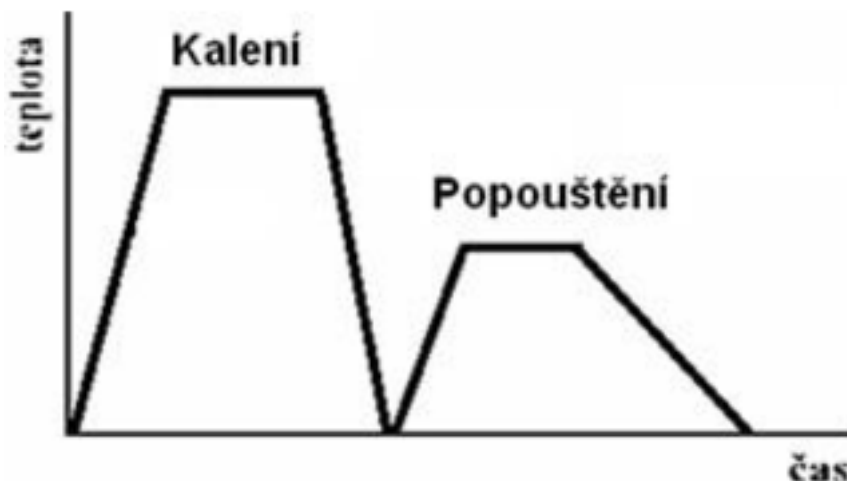
Prášková cementace: Je metoda chemicko-tepelného zpracování vhodná především při malém počtu kusů vzorků s proměnlivými požadavky na tvorbu vrstvy. Při zahřátí na teplotu vyšší než 800 °C se vytvoří z uhlovodíku cementačního prostředku, z jím absorbovaného vzdušného kyslíku, ze vzduchu nacházejícího se mezi zrný cementačního prostředku a zčásti také z přidaného aktivátoru kysličník uhelnatý. Účinek aktivátoru, který posiluje cementační účinek, není ještě stále vyjasněn. Obecně se pevné cementační prostředky skládají z: uhlíku, aktivátoru, plnidla, pojiva. Pevné cementační prostředky se chovají, co se týká limitního obsahu uhlovodíků, zásadně jinak než solné lázně.

Jiná část uhlíku vyhoří a podíl aktivátoru je odpovídajícím způsobem zvýšen. Podle okolností se může i část aktivátoru vypařit. Cementace se provádí umístěním vzorků do cementačního prostředí a následným zasypáním. Takto připravený materiál je vložen do pece. Volba granulátu závisí na hloubce cementace, na požadovaném stupni cementace a legování oceli. Jestliže zohledníme to, že obsah uhlíku ve vnější vrstvě stoupá s dobou cementace a že je ocel legovaná chromem z důvodu oduhlíčování karbidů, ocel legovaná chromnikem z důvodu tvorby zbytkového austenitu nesmí tak vysoce cementovat jako nelegovaná ocel, potom z toho vyplývá, že cementační granulát 6 se bude používat pro hloubky cementace více než 0,6 mm. Granulát 30 se bude používat pro hloubky do 2 mm.

Mezi výhody patří vysoká hospodárnost, nízké náklady, minimální propal, rovnoměrnost cementační vrstvy, jednoduchá a rychlá příprava.

9.2.2 Kalení a popouštění vzorků

Před samotným kalením je zapotřebí vzorky ochránit proti oduhlíčení. To se provádí speciálním nátěrem na bázi chloru. Kalení vzorků probíhá při kalicí teplotě 830 °C. Tato teplota je běžná teplota kalení pro uhlíkové oceli. Čas setrvání na teplotě kalení je 40 minut. Pro kalení je použito oleje, nebo vody. V našem případě bylo 10 vzorků kaleno v oleji a 5 ve vodě. Popouštění následuje vždy po kalení. Popouštěcí teplota byla zvolena na 170 °C a čas setrvání na 120 minut. Při popouštění se vzorky vkládají do vyhřáté pece.



Obrázek 19. - Postup kalení a popouštění [24]

9.3 Měření hloubky chemicko-tepelného zpracování

Princip měření spočívá v použití metody tvrdosti HV (Vickers) na metalograficky připraveném vzorku. Metoda tvrdosti HV - tento vzorek musí být vybroušen a vyleštěn. Hloubka vrstvy se stanovuje jako gradient tvrdosti na výbrusu kolmém k povrchu. Dá se odvodit z průběhu znázorňujícího závislost tvrdosti na vzdálenosti od povrchu.

9.3.1 Měření hloubky chemicko-tepelného zpracování pomocí běžných metod

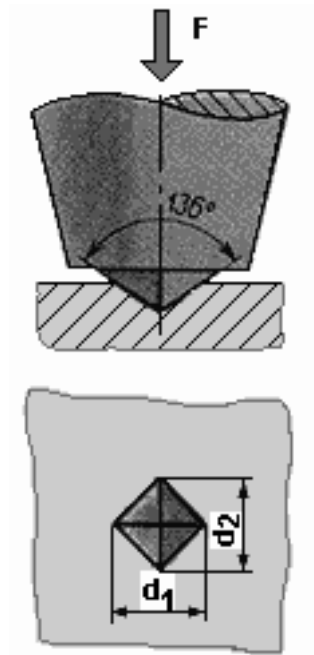
Měření hloubky chemicko-tepelného zpracování je závislé na metalografické přípravě vzorků, která se skládá z dělení materiálu na metalografické pile, dále zalisování, vybroušení a leštění vzorků.

Dělení vzorků: Dělení vzorků bylo prováděno na metalografické pile Struers disco-tom-6. V ideálním případě je zapotřebí materiál dělit v místě co nejvzdálenějšího od kraje. Naše vzorky jsou limitovány velikostí metalografického lisu a automatické metalografické brusky. Proto řezy provádíme v místě 10 mm od kraje.

Lisování vzorků: Tento postup byl prováděn na metalografickém lisu Struers citopress 10. Tento lis umožňuje zalisování vzorků do průměru 30 mm. Citopress je horký montážní lis, který disponuje vysokou rychlostí zalisování.

Leštění vzorků: Proces broušení a leštění byl zajištěn pomocí automatické metalografické brusky Struers tegramin 20. Jedná se o plně automatický přístroj, který sám dává množství vody a brusné pasty. Tato operace nám ulehčuje práci a tím i zrychluje dobu potřebnou pro výrobu metalografických vzorků.

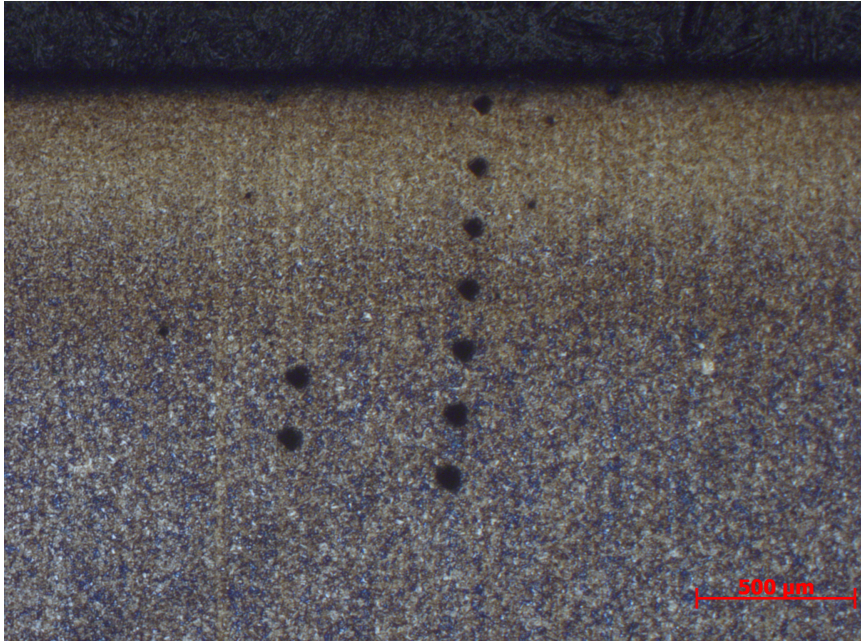
Měření tvrdosti provádíme metodou Vickerse podle normy ČSN ISO 6507-1. Je založena na vtlačování diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136 stupňů o síle F po určitou dobu. Takže v materiálu vznikají čtyřhranné vtisky. Po uplynutí předepsaného času se změří úhlopříčka vtisku. Síla, která vtlačuje indentor, je v našem případě vtlačována silou 1 kilogramu s dobou působení 12 sekund.



Obrázek 20. - Metoda měření tvrdosti Vickerse [25]

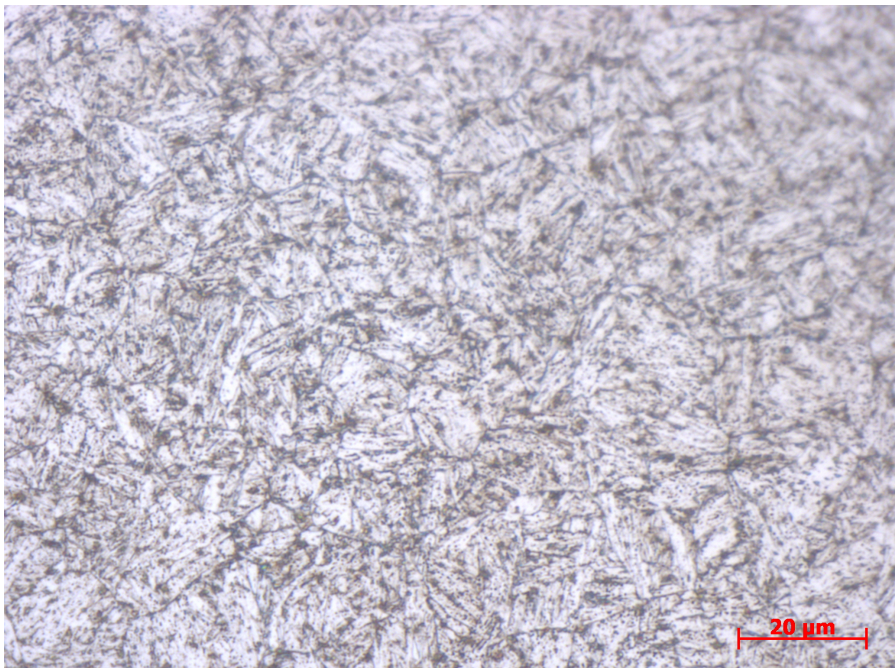
Pro praktickou potřebu měření tvrdosti používáme tabulky, v nichž zjistíme podle délky uhlopříček a použité síly odpovídající tvrdost. Výhody této metody spočívají v tom, že naměřené hodnoty jsou velmi přesné a vtisky tím, že jsou malé, nepoškozují obrobenu plochu. Naopak nevýhodou je skutečnost, že malý vtisk u nehomogenních materiálů (šedá litina) se nedodrží jednoznačné výsledky. Mezi další nevýhody patří, že se dá použít u povrchu, který má určitou drsnost.

Hodnocení výsledků tvrdosti nám popisují grafy a hloubka chemicko-tepelného zpracování je vidět i pod mikroskopem na obrázku 21, 22 a 23.

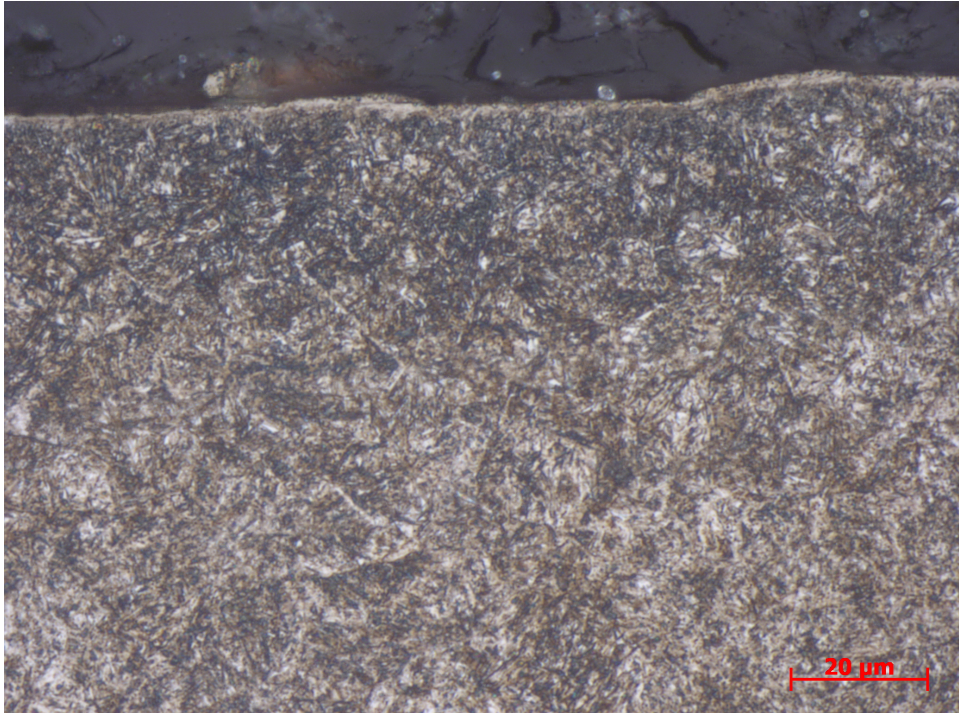


Obrázek 21. - Vrstva chemicko-tepelného zpracování

Na tomto pohledu je vidět hloubka chemicko-tepelného zpracování, které podle tabulky odpovídá tvrdostí na vzorku kaleném v oleji a cementovaném tři hodiny.



Obrázek 22. - Jádro vzorku, zvětšené 500x



Obrázek 23. - Cementovaná vrstva, zvětšená 500x

9.3.2 Naměřené hodnoty pomocí makrotvrdoměru

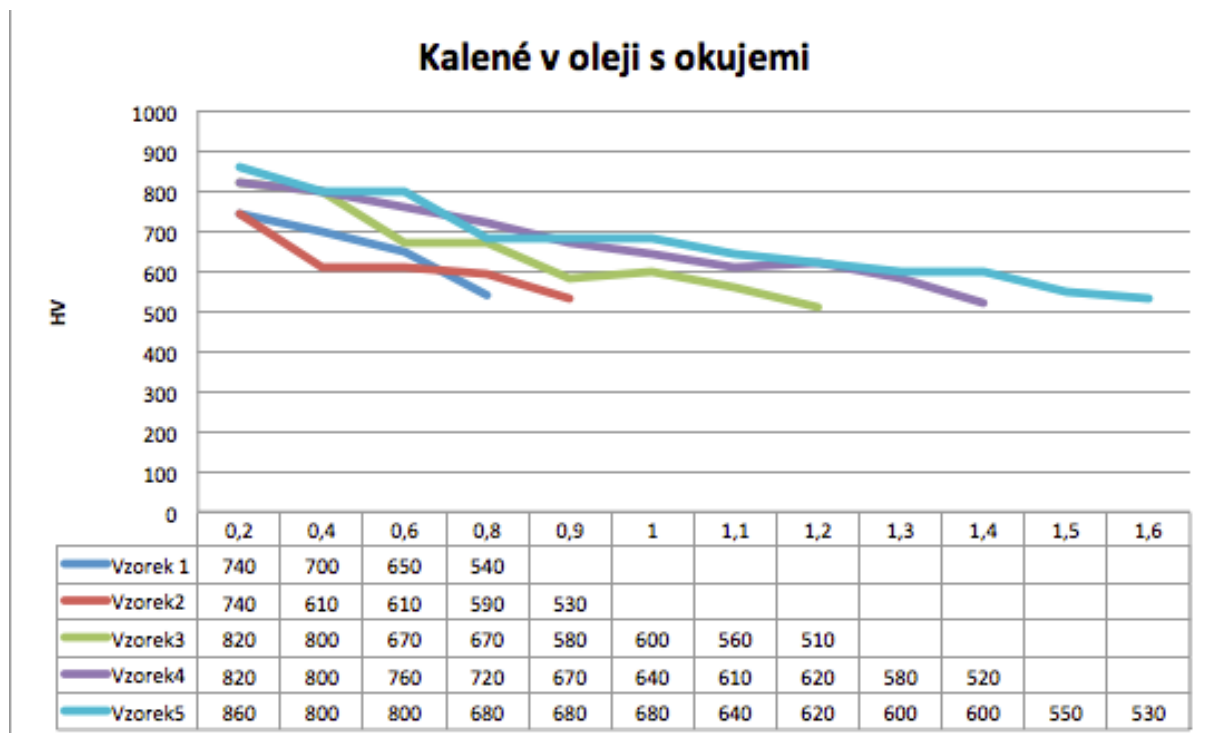
Naměřené hodnoty získáme měřením na patnácti vzorcích. Pět vzorků je kaleno v oleji, dalších pět opět v oleji, ale s odbroušenou vrstvou o hloubce jedné desetiny milimetru. Posledních pět je kaleno ve vodě. U posledních pěti vzorků je předpoklad vyšší tvrdosti s ohledem na větší rychlost ochlazení.

Vzorky kalené v oleji měřené s okujemi.

Hloubka (mm)	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Vzorek1	50,55	51,22	53,91	58,68	60,74							
Vzorek2	50,58	54,99	55,66	56,33	58,73	59,32						
Vzorek3	47,83	47,85	52,68	52,69	56,66	55,26	57,98	59,97				
Vzorek4	47,4	48,57	49,19	50,95	52,72	53,9	55,11	54,57	56,91	59,34		
Vzorek5	46,21	47,98	47,99	52,12	52,13	52,15	53,95	54,57	55,73	55,69	58,09	59,4

Tabulka 3. - Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Z těchto hodnot podle předpokladu vyplývá, že pátý vzorek má největší hloubku chemicko-tepelného zpracování. Vtisky byly prováděny do hloubky, kde se rozměr rovná 58,1 mm. V tomto rozměru se tvrdost struktury rovná tvrdosti materiálu, který nebyl tepelně zpracován a upravován. Celkový průběh rozměrů vtisků nám popisuje graf 1.



Graf 1. - Průběh tvrdosti I.

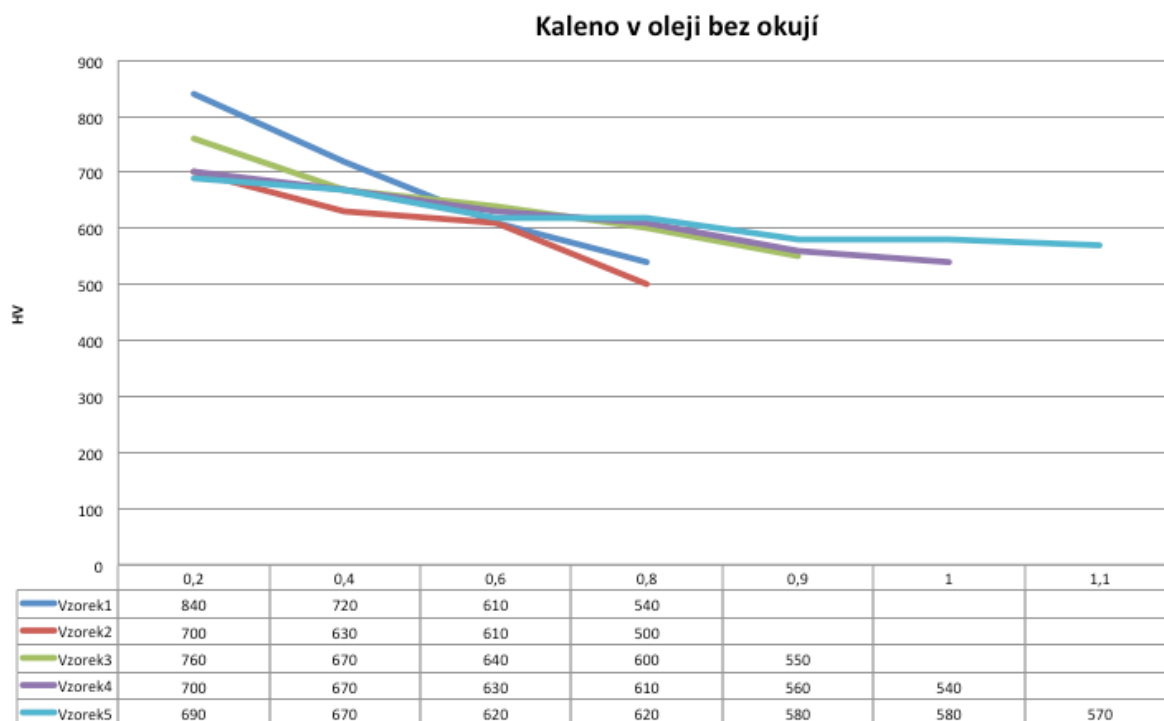
Vzorky kalené v oleji s odbroušenou vrstvou okují

Tyto vzorky byly tepelně zpracovány stejně jako vzorky s okujemi, tedy stejným chemicko-tepelným zpracováním. Rozdílem je, že u těchto vzorků byla strojně odebrána povrchová vrstva broušením okují o hloubce 0,1mm. Jedná se o vrstvu, která byla oduhličená. Oduhličění vzniká v procesu kalení.

hloubka	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1	1,1
vzo- rek1	47,14	50,52	55,24	58,59			
vzo- rek2	51,22	53,98	55,22	61,22			
vzo- rek3	49,86	52,53	53,88	55,89	58,3		
vzo- rek4	51,18	52,53	54,61	55,22	57,24	58,68	
vzo- rek5	51,92	52,5	54,55	54,58	55,96	56,57	57,25

Tabulka 4. - Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu

U těchto vzorků je hloubka chemicko-tepelného zpracování nižší, proto rozměr vtisků dosáhne rozměru 58,1 mm mnohem dříve než u vzorků s okujemi. Vrstva s okujemi se odstraňovala z důvodu porovnání vlivu okují na vířivé proudy, viz kapitola 9.3.2.



Graf 2. - Průběh tvrdosti II.

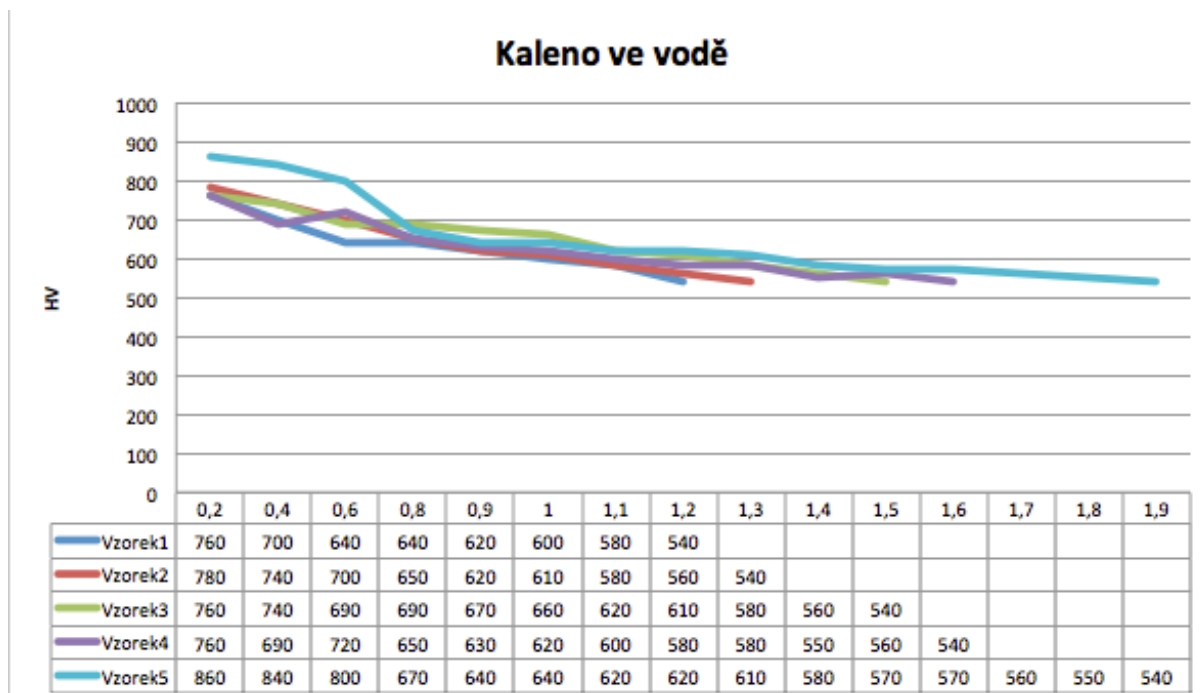
I z grafu je patrné, že konce chemicko-tepelného zpracování je dosaženo mnohem dříve než s okujemi.

Vzorky kalené ve vodě

hloub- ka	0,2	0,4	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9
vzo- rek1	49	51	53	53	54	55	56	58,65							
vzo- rek2	49	49	51	53	54	55	56	57,24	58,67						
vzo- rek3	51	51	51	51	52	53	54	55,22	56,57	57,92	58,59				
vzo- rek4	49	51	50	53	54	54	55	56,6	56,8	57,95	57,93	58,59			
vzo- rek5	46	47	47	52	53	53	54	54,89	55,26	56,58	57,27	57,24	57,25	58,09	58,6

Tabulka 5.- Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu

Z tabulky 5 je patrné, že hodnota hloubky chemicko-tepelného zpracování je u tohoto způsobu kalení mnohem větší než u oleje, protože rychlost ochlazování ve vodě je mnohem větší. Tento fakt nám potvrdil náš předpoklad.



Graf 3. - Průběh tvrdosti III.

Závěrem ke konvenčnímu měření tvrdosti lze říci, že je tato metoda velmi zdlouhavá a může při ní dojít k mnoha chybám způsobeným jak lidským, tak i strojním faktorem. Nevýhodou je také destruktivní hodnocení vzorků. Proto následující kapitola (9.3.2) navrhuje postup zkoumání chemicko-tepelného zpracování nedestruktivní metodou.

9.3.3 Měření hloubky chemicko-tepelného zpracování pomocí vířivých proudů

Metoda vířivých proudů je založena na elektromagnetické indukci, kdy střídavý proud prochází vodičem jako měděným drátem. Tím se kolem vodiče vytváří magnetické pole. Vířivé proudy jsou proudy, které jsou indukované a tekoucí po kruhové dráze. Tato metoda má velkou výhodu v možnosti aplikace v několika odvětvích. Mezi hlavní odvětví patří NDT metody. Dále se dají použít pro měření tloušťky materiálu, detekci tepelného poškození, měření vodivosti materiálů a v neposlední řadě pro kontrolu tepelného zpracování. Omezením jsou pro vířivé proudy pouze kontroly vodivých materiálů, sonda musí mít dobrý přístup k povrchu. U této metody je zapotřebí měřicích etalonů. Výrobu etalonů jsme si popsali v předešlých kapitolách.

Pro měření vířivými proudy je zapotřebí sond, které jsou dostupné ve velké škále tvarů a velikostí. Sondy se dají použít pro mnoho aplikací, jako je např. testování trubek zevnitř. Pro naše měření jsme použili sondy diferenčního typu.

Diferenční sondy: Mají dvě činné cívkky, které jsou obvykle vinuté v protifázi. Výhodou těchto sond je jejich velká citlivost na defekty a malá citlivost na okolní vlastnosti, jako je nízká teplota. Mezi nevýhody patří například obtížné interpretování signálu, když je třeba vada delší než vzdálenost mezi cívkami. V případě pro hodnocení chemicko-tepelného zpracování používáme sondy: Olympus PL/500KHz-2MHz/A a v můstkovém zapojení Olympus NDT NEC-2236/7L 5-250KHz BRIDGE.

Tyto sondy jsou spojeny s měřicím zařízením Olympus Nortec 500D, na kterém probíhá celé měření pomocí metody vířivých proudů.

Olympus Nortec 500D

Tento přístroj v sobě sdružuje mnoho funkcí, jako jsou VGA výstup pro monitor, USB konektor pro přenos informací. Dále zahrnuje power link pro automatické rozpoznání sondy. Tento model Nortec je dostupný ve čtyřech konfiguracích. Každá z nich obsahuje USB port a vyšší rozlišení a potlačení šumu. Nortec je vybaven zesilovačem pro získání informací v náročných testech. Další výhodou přístroje je jeho hmotnost a rozměry, což umožňuje snadný transport.

9.3.4 Naměřené hodnoty hloubky chemicko-tepelného zpracování pomocí metody vířivých proudů

Prvním krokem při měření je stanovení si parametrů zesílení a frekvence pro konkrétní případ použití. Vzhledem k tomu, že frekvence nám udává hloubku vnikání vířivých proudů do materiálu, je zapotřebí ji stanovit tak, aby pokryla celou hloubku chemicko-tepelného zpracování. Frekvence se liší s použitím jiných sond. Pro sondu PL500KHz-1MHz/A byla zvolena frekvence 1,5 MHz a u sondy typu BRIDGE byla zvolena nejvyšší možná frekvence 250 KHz.

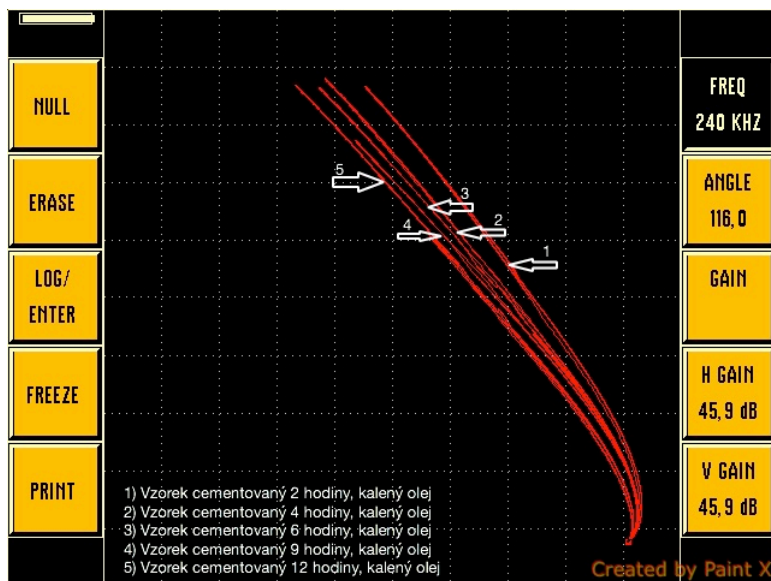
V rozmezí nastavení těchto frekvencí se dá předpokládat pokrytí celého spektra hloubky chemicko-tepelného zpracování. V tomto nastavení jsme vyhodnotili hodnoty nejvýraznější, tedy nejlépe hodnotitelné.

Měření jsme prováděli na vzorcích, které jsme rozdělili na tři měření, která jsme dělili podle způsobů kalení, tedy kalené do vody, oleje a oleje bez okují. Vzorky kalené v oleji jsme použili ve dvou řadách z důvodu porovnání vlivu okují na rozkmit vířivých proudů. Měření

bylo zjištěno, že vliv okují je zanedbatelný, materiál lze tedy kontrolovat hned po chemicko-tepelném zpracování.

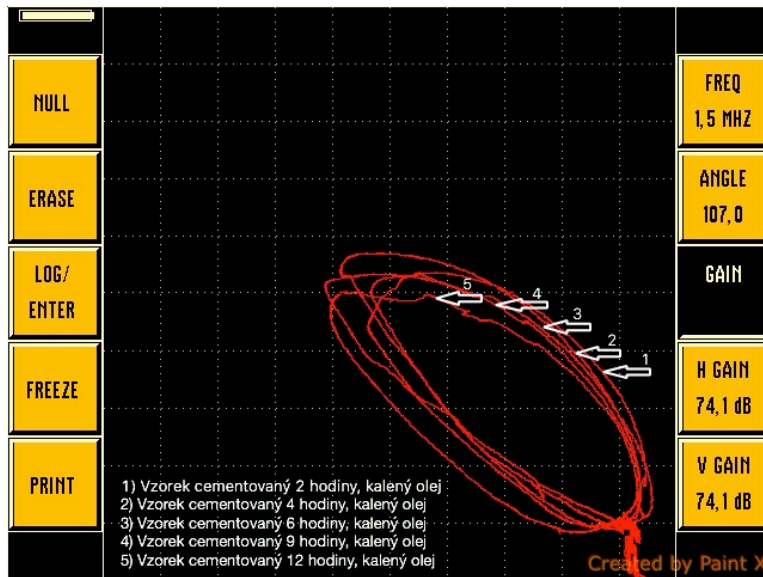
Vzorky kalené v oleji

U těchto vzorků bylo zapotřebí zesílení o hodnotě 45,9 dB a pracovní frekvenci 240 kHz. Z obr. 24 je vidět posun křivek směrem doleva se stoupající hodnotou cementace. Zde byla použita sonda typu BRIDGE. S její pomocí je hodnota zpracování viditelná nejvíce.



Obrázek 24. - Měření – vzorek cementovaný, kalený v oleji BRIDGE

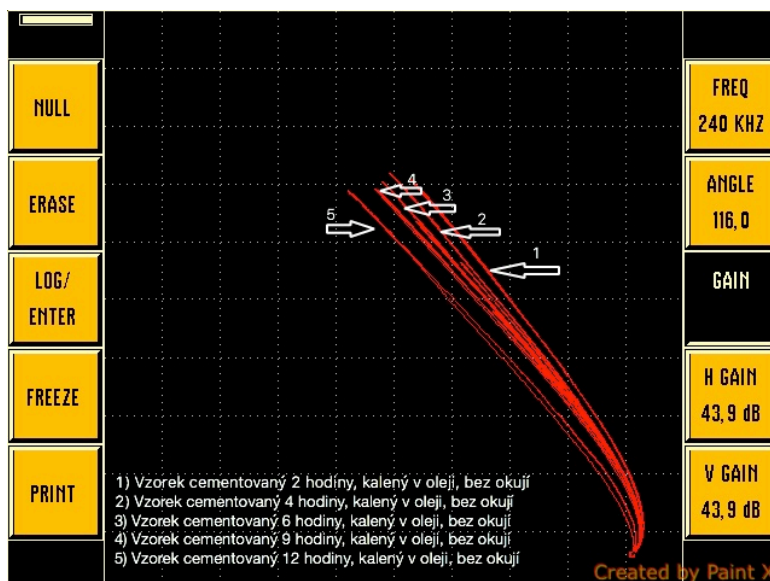
Dále byla u měření takto zpracovaných vzorků použita sonda diferenční 500 kHz-1MGz, kde pohyb pracovního bodu vytváří charakteristické smyčky.



Obrázek 25. - Měření – vzorek cementovaný, kalený v oleji

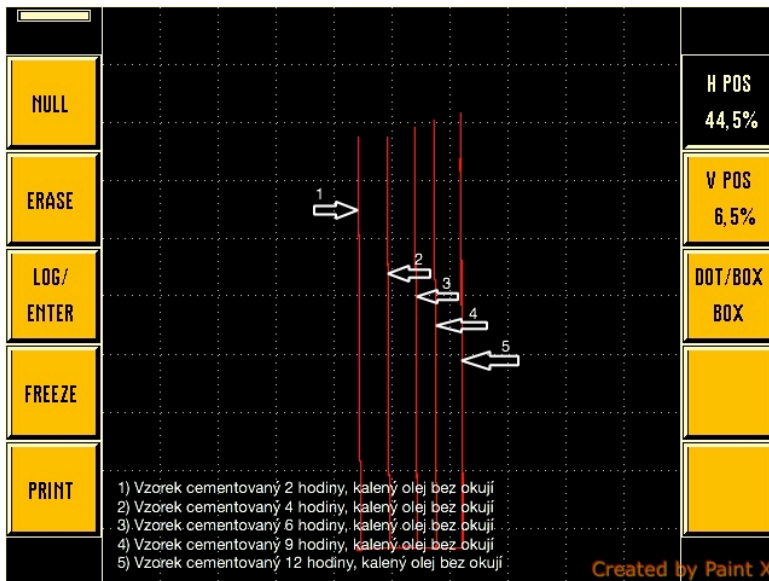
Vzorky kalené v oleji bez okují

Dalším měřením jsme chtěli porovnat vliv okují na výchylku křivek. Bylo zjištěno, že okuje nemají na měření žádný vliv.



Obrázek 26. - Měření – vzorek cementovaný, kalený v oleji bez okují BRIDGE

Dále jsme experimentálně vynulovali hodnotu horizontálního zesílení pro kontrolu hodnot pouze v jednom směru, což se u cementace nedalo použít. Z tohoto měření je nejlépe vidět hodnota hloubky chemicko-tepelného zpracování.



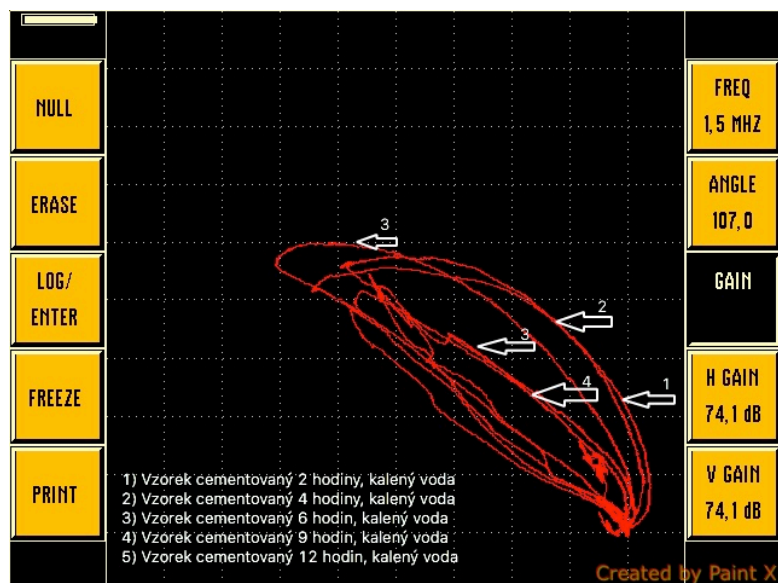
Obrázek 27. - Měření – vzorek cementovaný, kalený v oleji bez okují h

Vzorky kalené ve vodě

Jako poslední experimentální měření jsme porovnávali vliv způsobu kalení. U toho zpracování je vidět největší rozdíl u křivek. Nastavené hodnoty frekvencí a zesílení zůstaly stejné jako v případě kalení v oleji.

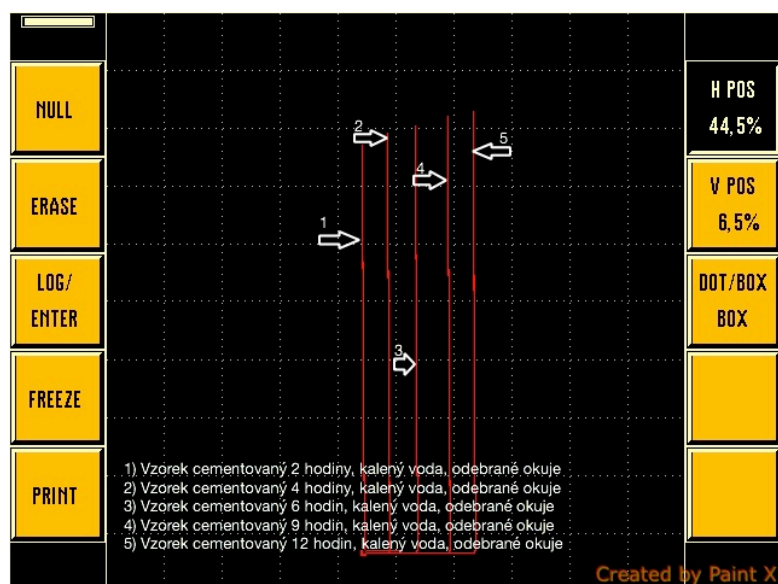


Obrázek 28. - Měření – vzorek cementovaný, kalený ve vodě BRIDGE



Obrázek 29. - Měření – vzorek cementovaný, kalený ve vodě

Úplně poslední bylo měření bez horizontálního měření.



Obrázek 30. - Měření – vzorek cementovaný, kalený ve vodě h

Diskuze získaných výsledků

Závěrem měření je třeba říci, že tato metoda je použitelná pro hodnocení chemicko-tepelného zpracování. Může být použito kalení ve vodě i v oleji. Dále se tato metoda dá použít pro hodnocení cementační vrstvy. Za výhodu se dá považovat fakt, že na měření nemá vliv povrch s okujemi. Dle získaných výsledků se dá konstatovat, že se toto měření dá aplikovat do strojírenské praxe. V další kapitole se budeme zabývat hodnocením chemicko-tepelného zpracování na reálném hotovém výrobku od zadavatele bakalářské práce MKV ozubená kola s. r. o.

9.4 Hodnocení chemicko-tepelného zpracování na výrobku

Kapitola 9.4 se zabývala aplikováním předem získaných informací na reálném výrobku. Výrobek (pastorek) byl dodán zadavatelem bakalářské práce firmou MKV ozubená kola s. r. o. zabývající se výrobou ozubení a jeho chemicko-tepelným zpracováním. Tento pastorek je používán v těžařském průmyslu, konkrétně na důlním kolesovém rypadle KU 300, v převodové skříní pro pohon zdvihu s výkonem 100Kw. Protokol o chemicko-tepelném zpracování byl dodán subdodavatelem firmy.

9.4.1 Dodaný protokol o chemicko-tepelném zpracování

Cod formular: CIN 01

		CERTIFICAT DE INSPECȚIE Inspection certificate EN 10.204-3.1.				Nr. No. 139	Pag. Sheet 1
C-dă/ Works no.:		TRATAMENT TERMIC Heat treatment				Data: Date: 03.03.2017	
						Beneficiar/Customer: NEPTUN SA	
Nr. No.	REPER Item	DESEN Drawing	MATERIAL Material	ȘARJĂ Charge	BUC. Pieces	NR.LOT T.T. H.T. Batch no.	SERII Series
1	R.D.	PS 6051.02	16MnCr5		1	C17-24403	—
2	R.D.	PSE 4277.04.	12GMnMo7-6		4	—	12391
3	Moșc	PS 6269.13	16MnCr5		5	—	—
4	P.C.	PSE 6134.01	12GMnMo7-6		1	—	12368
5	R.D.	PSE 4326.07A.	12GMnMo7-6		2	—	12391/
6	A.C.	PSE 5599.16.	12GMnMo7-6		2	—	12354
7	A.C.	PS 6693.01	16MnCr5		1	—	—
8	R.D.	PSE 5665.19	12GMnMo7-6		2	—	12392
9	R.D.	PS 6693.02	16MnCr5		1	C17-24403	—
10							
11							
12							
13							
14							
15							

Parametrii calitativi verificați

Nr. No.	TR.TERMIC Heat treatment	DURITATE Case Hardness	DURITATE STRAT Case hardness	DURITATE MIEZ Middle hardness	ADÂNCIME STRAT Case depth	MICRO Microstr	VERDICT Responses
1	Templare	—	58-61HRC	—	1,35mm	—	OK
2	—	—	—	—	—	—	OK
3	—	—	—	—	—	—	OK
4	—	—	—	—	—	—	OK
5	—	—	—	—	—	—	OK
6	—	—	—	—	—	—	OK
7	—	—	—	—	—	—	OK
8	—	—	—	—	—	—	OK
9	Templare	—	58-61HRC	—	1,35mm	—	OK
10							
11							
12							
13							
14							
15							

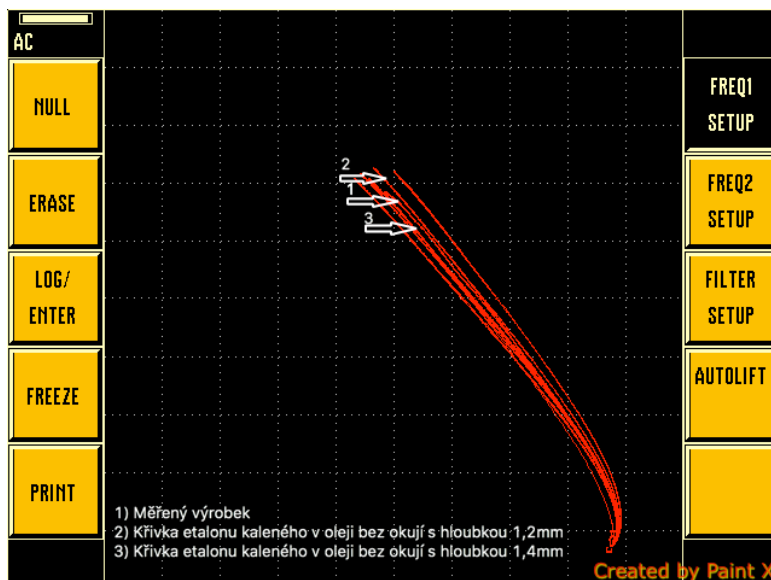
SC DUROTERM srl	256 Basarabia Blvd 030352 Bucharest 3 ROMANIA	Fax: +4 021.255.50.98 Phone: +4 021.255.50.98 +4 021.255.19.15	INSPECTOR CFC	
			NUME/ Name: D. C. C.	
			Signature	

Obrázek 31. - Protokol o chemicko-tepelném zpracování

Z tohoto protokolu je patrné, že podle subdodavatele bylo při tepelném zpracování materiálu 18CrNiMo7-6 dosaženo tvrdosti povrchu 58-61 HRC a hloubky 1,35 mm. Tyto parametry se shodují s parametry uvedenými na výkresové dokumentaci, která je přílohou.

9.4.2 Měření výrobku metodou vířivých proudů

Toto měření vychází z předpokladů uvedených v předcházející části experimentu. Tímto měřením byla prokázána vhodnost použití metody vířivých proudů pro hodnocení kvality a hloubky chemicko-tepelného zpracování. Metodou bylo zjištěno, že použitím vhodných etalonů bez okují odpovídá hloubka chemicko-tepelného zpracování hloubkám CHTZ uvedeným v protokolu – viz obr. 30. Nastavené parametry se shodují s parametry pro měření vzorků kalených v oleji i s odstraněnou vrstvou okují.



Obrázek 32. - Výsledek měření výrobku

Z obrázku 31 je vidět, že křivka průběhu měření pastorku se pohybuje mezi křivkami 2 (1,2 mm hloubky CHTZ) a 3 (1,4 mm hloubky CHTZ), což prokazuje, že hodnotu chemicko-tepelného zpracování a její hloubku lze stanovit s přesností minimálně na 0,5 mm.

10 Závěr

Potřeba znát hodnocení kvality ozubených kol je nedílnou součástí strojírenství, kdy kvalitu materiálu hodnotíme proto, abychom získali představu o složení materiálu a životnosti výrobku. Kvalita materiálu je v dnešní době záležitostí prioritní, jelikož sílí konkurenční boj a otevírají se nové trhy.

V souladu s vytýčenými cíli v úvodu této práce byla řešena problematika nedestruktivního zkoušení a návrhy experimentálního programu ohledně chemicko-tepelného zpracování. V teoretické části bylo popisováno použití nedestruktivního hodnocení na částech převodovek a samotných převodech. Popsány byly postupně všechny metody NDT pro tyto aplikace.

V další části byli probírány druhy a postupy chemicko-tepelného zpracování a jejich vhodné aplikace. Po důkladném seznámení se všemi postupy a druhy zpracování bylo přistoupeno k experimentálnímu návrhu řešení.

Pro praktickou část byl společností MKV ozubená kola s. r. o. poskytnut materiál na výrobu etalonů, tak aby bylo možné provést kontrolu chemicko-tepelného zpracování s ohledem na požadavky zákazníků. S ohledem na zkušenosti byla pro kontrolu chemicko-tepelného zpracování vybrána metoda vířivých proudů. Volba této metody vycházela z důvodu širokého záběru jejich možností a jednoduchosti, i z důvodu nižších nákladů na hodnocení chemicko-tepelného zpracování, především díky menším vstupním nákladům (energie, čas, absolutní nedestruktivnost metody).

Pro potřeby experimentálního programu byli vyrobeny a vhodně zpracovány etalony, které sloužily k porovnávání a ověřování struktury materiálu v dodaném stavu a ve stavu žíhaném. Měřeními byli získány hodnoty hloubky chemicko-tepelného zpracování v podélném a příčném řezu vzorku.

Porovnáním výsledné křivky etalonu s křivkami reálného výrobku bylo možné vyhodnotit parametry materiálu z hlediska provedení tepelného zpracování.

Výsledkem experimentálního programu bylo zjištění, že tato metoda je použitelná pro hodnocení hloubky a kvality chemicko-tepelného zpracování.

11 Seznam zdrojů

Knižní publikace

- [2] SKÁLOVÁ, J., KOVAŘÍK, R., BENEDIKT, V. *Základní zkoušky kovových materiálů*. Plzeň: ZČU, 2010.
- [3] KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
- [4] *Metals handbook*. 9th ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1989. ISBN 0-87170-007-7.
- [5] SHULL, Peter J. *Nondestructive evaluation: theory, techniques, and applications*. New York: M. Dekker, 2002. Mechanical engineering (Marcel Dekker, Inc.), 142. ISBN 0-8247-8872-9.
- [6] PREPARED UNDER THE DIRECTION OF THE ASM HANDBOOK COMMITTEE a prepared PLANNED. *ASM handbook*. Rev. ed. [ie 10th ed.]. Materials Park, Ohio: American Society for Metals, 1991. ISBN 0871703793.
- [7] *Kurz tepelného zpracování: učební texty*. Praha: Ecosond, 2009. ISBN 978-80-904462-1-2.
- [11] STANĚK, J., NĚMEC, J. *Metodika zpracování a úprava diplomových (bakalářských) prací*. Plzeň: ZČU, 2005.
- [12] VAŠÍČEK, D. *Nedestruktivní zkoušení materiálu*. Brno: Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2008. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Josef Filípek.
- [13] KRAUS, V. *Technologie tepelného zpracování*. Plzeň: ZČU, 1992.
- [14] BECHNÝ, Daniel. *Historie a současnost podnikání na Plzeňsku*. Žehušice: Městské knihy, 2002. Historie a současnost podnikání v regionech ČR. ISBN 80-86699-01-3.
- [15] HOLÝ, P. *Konstrukční návrh kuželočelní převodovky o výkonu 630kW*. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014. Diplomová práce. Vedoucí práce Jaroslav Krátký.
- [16] KUBEŠ, Matěj. *Diagnostika vodivých materiálů vířivými proudy*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2010. Bakalářská práce. Vedoucí práce Jakub Král.
- [17] *Eddy current testing at level 2: Manual for the Syllabi Contained in IAEA*. Vienna, 2011.

Publikace na internetu

- [1] MACEK, K. *Struktura a vlastnosti materiálů a jejich zkoušení*.
http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3-6_vady-vyrboku-a-zkousky-bez-poruseni.pdf Praha: ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ, Fakulta strojní katedra materiálového inženýrství, 2014.
- [8] DRIML, B. *Kalení a Popouštění*.
<http://www.elitalycea.wz.cz/files/tep/tep07.pdf> 2015
- [9] KRAUS, V. *Tepelné zpracování a slinování*.
<http://tzs.kmm.zcu.cz/TZSprcelk.pdf> 2015
- [10] *Nitridování ocelí. Tumlikovo: Metal Cutting Technologies*.
<http://www.tumlikovo.cz/nitridovani-oceli> 2011
- [18] *Nedestruktivní defektoskopie v průmyslu*.
http://www.ndt.cz/prilohy/33/principy_EC.pdf 2009
- [19] *Cementační granulát Durferrit-příručka použití*.
<http://azprokal.cz/cs/prehled-sortimentu/chemicke-pripravky/cementacni-prasky/> 2015
- [20] *Kapilární zkouška*.
http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2056
- [21] *Ultrazvuková zkouška-průchodová metoda*
http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06c_nedestruktivni.php
- [22] *Princip ultrazvukové metody*
http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2076
- [23] *Magnetická nedestruktivní zkouška*
<http://www.gammalux.cz/metody.php>
- [24] *Metody kalení a popouštění*
<http://slideplayer.cz/slide/2863743/>
- [25] *Metody měření povrchové tvrdosti*
<http://www.converter.cz/jednotky/tvrdost-vickers.htm>

12 Seznam obrázků

Obrázek 1. - Schéma kapilární zkoušky	12
Obrázek 2. - Nanesená detekční tekutina	12
Obrázek 3. - Výsledek kapilární zkoušky	13
Obrázek 4. - Kontrola svarů	13
Obrázek 5. - Kontrola svarů	14
Obrázek 6. - Schéma průchodové metody	16
Obrázek 7. - Schéma odrazové metody.....	17
Obrázek 8. - Zkouška magnetická NDT.....	19
Obrázek 9. - Vnitřní sonda	21
Obrázek 10. - Obklopující sonda.....	22
Obrázek 11. - Povrchová sonda.....	22
Obrázek 12. - Příklady způsobu ponořování výrobků do kalicí lázně	33
Obrázek 13. - Typy trhlin vznikající při tepelném zpracování ocelových výrobků.....	34
Obrázek 14. - Logo MKV ozubená kola s. r. o.	35
Obrázek 15. - Materiálový protokol	37
Obrázek 16. - 18CrNiMo7-6 podélný řez nežíhaného (dodaného) materiálu, zvětšení 200x. 39	39
Obrázek 17. - 18CrNiMo7-6 příčný řez dodaného materiálu, zvětšení 200x.....	39
Obrázek 18. - 18CrNiMo7-6 podélný řez žíhaného materiálu, zvětšení 500x	40
Obrázek 19. - Postup kalení a popouštění	41
Obrázek 20. - Metoda měření tvrdosti Vickerse	43
Obrázek 21. - Vrstva chemicko-tepelného zpracování	44
Obrázek 22. - Jádru vzorku, zvětšené 500x	44
Obrázek 23. - Cementovaná vrstva, zvětšená 500x	45
Obrázek 24. - Měření – vzorek cementovaný, kalení v oleji BRIDGE.....	52
Obrázek 25. - Měření – vzorek cementovaný, kalení v oleji	53
Obrázek 26. - Měření – vzorek cementovaný, kalení v oleji bez okují BRIDGE.....	53
Obrázek 27. - Měření – vzorek cementovaný, kalení v oleji bez okují h.....	54
Obrázek 28. - Měření – vzorek cementovaný, kalení ve vodě BRIDGE	54
Obrázek 29. - Měření – vzorek cementovaný, kalení ve vodě	55
Obrázek 30. - Měření – vzorek cementovaný, kalení ve vodě h	55
Obrázek 31. - Protokol o chemicko-tepelném zpracování	57
Obrázek 32. - Výsledek měření výrobku	58

13 Seznam grafů

Graf 1. - Průběh tvrdosti I.	47
Graf 2. - Průběh tvrdosti II.	48
Graf 3. - Průběh tvrdosti III.	50

14 Seznam tabulek

Tabulka 1. - Tabulka naměřených hodnot vtisků	38
Tabulka 2.- Tabulka vypočtených hodnot vtisků	38
Tabulka 3. - Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu	46
Tabulka 4. - Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu	48
Tabulka 5. - Tabulka rozměru vtisků v závislosti na vzdálenosti od povrchu	49

15 Seznam zkratk

kHz- kilohertz

t.j.- to je

apod.- a podobně

MHz- megahertz

mm- milimetr

NDT- nondestructive testing- nedestruktivní testování

°C- stupně Celsia

atd.-a tak dále

s.r.o.- společnost s ručením omezeným

a.s.- akciová společnost

kW- kilowatt

CHTZ- chemicko-tepelné zpracování