

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta strojní

Ústav materiálového inženýrství – Ú12132



Diplomová práce

Optimalizace procesu indukčního popouštění dílu
Achse Ziehkeil

2018

Jan Dudlíček

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Dudlíček** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **408870**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávací katedra/ústav: **Ústav materiálového inženýrství**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní a materiálové inženýrství**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Optimalizace procesu indukčního popouštění dílu Achse Ziehkeil

Název diplomové práce anglicky:

Optimization of induction tempering of piece Achse Ziehkeil

Pokyny pro vypracování:

Literární rešerše v oblasti indukčních ohřevů.
Příprava experimentu technologie indukčního popouštění, stanovení parametrů.
Stanovení kritérií hodnocení, zkoušky tvrdosti, mikrostrukturní analýza, vyhodnocení povrchové tvrdosti.
Vyhodnocení experimentu, doporučení pro praxi, posouzení možnosti zkoušky na dílech bez ochranné pasty před cementováním.
Diskuse, závěry.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Macek, J., Janovec, J., Jurčí, P., Zuna, P.: Kovové materiály, Nakladatelství ČVUT, Praha 2006.
[2] Macek, K., Zuna, P., Janovec J.: Tepelné úpravy kovových materiálů. Vyd. 2., přeprac. Praha: Vydavatelství ČVUT, 2001. ISBN 80-01-02287-0.
[3] Kaus, V. Tepelné zpracování a slinování, Plzeň: 1999.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jakub Horník, Ph.D., ústav materiálového inženýrství FS

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

Datum zadání diplomové práce: **03.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **30.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: _____



Ing. Jakub Horník, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



prof. RNDr. Petr Špatenka, CSc.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

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

17. 4. 2018

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

ANOTAČNÍ LIST

Jméno autora:	Jan Dudlíček
Název DP:	Optimalizace procesu indukčního popouštění dílu Achse Ziehkeil
Název anglicky:	Optimization of induction tempering of piece Achse Ziehkeil
Rok:	2018
Obor studia:	Výrobní a materiálové inženýrství
Ústav / odbor:	Ústav materiálového inženýrství
Vedoucí:	Ing. Jakub Horník, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jan Politzer
Bibliografické údaje:	počet stran: 80 počet obrázků: 68 počet tabulek: 3
Klíčová slova:	indukce, indukční tepelné zpracování, tvrdost HRC
Keywords:	induction, induction heat treatment, hardness HRC

Anotace:

Tato diplomová práce se zabývá indukčním tepelným zpracováním dílu pro automobilový průmysl. Cílem práce je určit optimální parametry pro díl s proticementační pastou. Dále je cílem provést rozbor pracovního cyklu indukčního tepelného zpracování a provést úvahu týkající se dílu bez proticementační pasty.

Abstract:

This diploma thesis is focusing on the induction heat treatment of parts for automotive industry. The objective of the thesis is to determine the optimal parameters for the carburized parts with stop-off compounds. Another goal established in the thesis is to analyze the working process of induction heat treatment and to reflect on the parts treated without the stop-off compounds.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DUDLÍČEK, Jan. *Optimalizace procesu indukčního popouštění dílu Achse Ziehkeil*. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Jakub Horník, Ph.D.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem svojí diplomovou práci vypracoval samostatně s použitím pouze podkladů uvedených v příloženém seznamu a na základě konzultací a pod vedením vedoucího a konzultanta diplomové práce.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne _____

Jan Dudlíček

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu, doktoru Horníkovi, za poskytnuté rady a připomínky při vypracovávání diplomové práce.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Janu Politzerovi a Ing. Ondřeji Holečkovi za konzultace a připomínky k diplomové práci.

Také bych chtěl poděkovat zaměstnancům společnosti KERN-LIEBERS CR spol. s r.o. za rady, připomínky a věnovaný čas v průběhu vypracovávání diplomové práce.

Obsah

1. Úvod	9
2. Teoretická část	10
2.1. Tepelné zpracování.....	10
2.1.1. Žihání	11
2.1.2. Kalení	14
2.1.3. Popouštění	16
2.1.4. Vnitřní pnutí a trhliny při tepelném zpracování	19
2.2. Indukční ohřev	19
2.2.1. Historie	19
2.2.2. Princip indukčního ohřevu	20
2.2.3. Volba frekvence	25
2.2.4. Ohřev vsázky	25
2.3. Indukční popouštění.....	27
2.4. Induktory	29
2.4.1. Nízkofrekvenční ohřev.....	31
2.4.2. Středofrekvenční a vysokofrekvenční ohřev.....	31
2.4.3. Vnitřní ohřev	32
2.4.4. Speciální konstrukce induktorů	33
3. Cíl diplomové práce	35
4. Experimentální část	36
4.1. Výrobek Achse Ziehkeil.....	36
4.1.1. Požadavky.....	37
4.1.2. Materiál	38
4.1.3. Technologický postup.....	41
4.1.4. Díl bez proticementačního přípravku.....	47
4.2. Indukční zařízení.....	49
4.3. Stanovení optimálních parametrů	51
4.3.1. Metoda DOE	51
4.3.2. Stanovení optimálních parametrů	52
4.3.3. Výsledné hodnoty.....	53
4.4. Průběh tvrdosti od špičky dílu	58
5. Závěr	62

5.1. Achse Ziehkeil – vzorky bez proticementační pasty.....	64
Použitá literatura.....	65
Použitá zařízení.....	67
Přílohy	68
Příloha 1.....	68
Příloha 2.....	70
Příloha 3.....	72
Příloha 4.....	75
Příloha 5.....	77
Příloha 6.....	78
Příloha 7.....	79

1. Úvod

Diplomovou práci jsem vypracoval ve spolupráci s oddělením kalírny společnosti KERN-LIEBERS CR spol. s r.o.

Kalírna společnosti KERN-LIEBERS CR spol. s r.o. disponuje v současnosti třemi pecemi pro indukční tepelné zpracování. Dvě z nich jsou určeny pro indukční kalení a další pro indukční popouštění.

Indukční pec pro popouštění od společnosti RAJMONT s.r.o. je v současnosti nevyhovující pro moderní provoz, protože nedisponuje dostatečným výstupem dat ohledně probíhajícího cyklu. To vede ke zpracování dílů, aniž by bylo jisté, že pracovní cyklus proběhl správně a bylo dosaženo požadovaných vlastností (neprobíhá 100% kontrola dílů po indukčním popouštění).

Tato diplomová práce se zabývá optimalizací procesu indukčního popouštění, ocelové součásti Achse Ziehkeil.

Indukční popouštění je založeno na přímém ohřevu, kdy vzniká teplo přímo v ohřívaném materiálu. Výhodou oproti konvenčnímu ohřevu v peci je ohřev lokální, a proto je tepelně ovlivněna jen určitá část dílu.

Celkový čas pracovního cyklu je velmi krátký, řádově v jednotkách sekund. V popouštěcích pecích probíhá ohřev minimálně 2 hodiny.

2. Teoretická část

2. 1. Tepelné zpracování

Tepelné zpracování oceli spočívá v ohřevu, výdrži na teplotě a následném ochlazení. Cílem tepelného zpracování je vytvořit podmínky pro fázové přeměny ve struktuře za účelem dosažení požadovaných vlastností.

Jednotlivé druhy tepelného zpracování se liší teplotou ohřevu, dobou výdrže a rychlostí ochlazování. Přehled druhů tepelného zpracování ocelí je uvedený na obrázku 2. 1.

Tepelné zpracování							
Žihání		Kalení			Popouštění		
bez překrytalizace	s překrytalizací	martenzitické		bainitické		nizkoteplotní	vysokoteplotní
na snížení pnutí	homogenizační	nepřetržité	přetržité	nepřetržité	izotermické		
rekrytalizační	normalizační		lomené				
na měkko	izotermické		termální				
protivložkové	kombinované		se zmrazováním				
rozpouštěcí							

Obrázek 2. 1 Rozdělení tepelného zpracování [1]

Ohřev materiálu může probíhat v:

- komorové peci – plynové nebo elektrické
- šachtové peci
- zvonové peci
- kelímkové peci
- muflové peci
- bubnové peci
- válečkové nebo pásové průběžné peci
- karuselové peci
- vakuové peci

Ve všech uvedených zařízeních probíhá nepřímý ohřev – teplo je materiálu dodáváno z prostředí pece. [2]

Mimo konvenčního ohřevu můžeme provádět indukční ohřev, u kterého není teplo předáváno materiálu z prostředí, ale vzniká v určité vrstvě v materiálu.

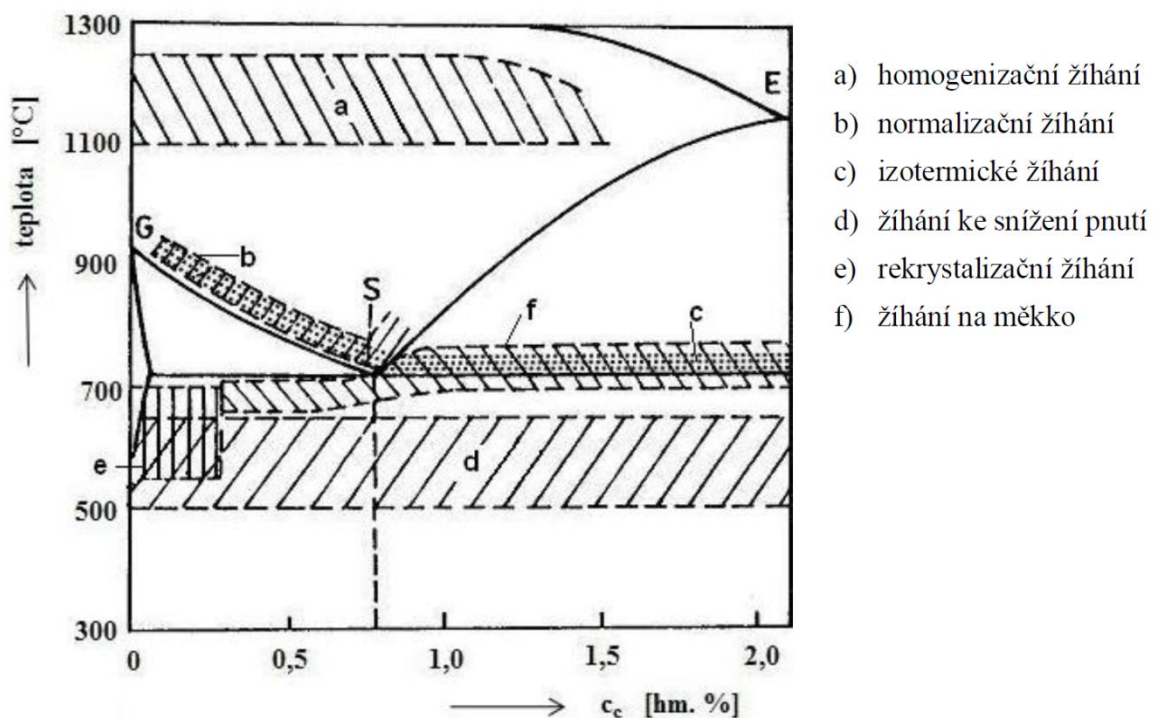
2. 1. 1. Žihání

Jde o tepelné zpracování, které spočívá v ohřevu, výdrži na žihací teplotě a následném ochlazení. Jednotlivé druhy žihání se dělí podle žihací teploty, doby výdrže a rychlosti ochlazování (viz obrázek 2. 2).

Základní dělení žihání je na žihání bez překrystalizace a žihání s překrystalizací. Žihání bez překrystalizace probíhá pod teplotou polymorfní přeměny, pokud dané slitina transformaci krystalové mřížky prodělává. Nad touto teplotou (při změně krystalové mřížky matrice) pak hovoříme o žihání s překrystalizací.

Žihání s překrystalizací se provádí pro zvýšení rovnoměrnosti struktury a větší homogenity chemického složení. Probíhá při teplotách vyšších než teplota A_{c1} a dochází k úplné nebo částečné přeměně feriticko-perlitické struktury na austenit. Podautektoidní oceli se žihají při teplotách vyšších než teplota A_{c3} , nadeutektoidní oceli při teplotách vyšších než A_{c1} . [3]

Žihání bez překrystalizace probíhá při teplotách nižších než A_{c1} a v ocelích dochází pouze ke strukturálním změnám. [3]



Obrázek 2. 2 Přehled žihacích teplot [3]

Mezi žíhání s překrytí patří:

Homogenizační žíhání

Homogenizační žíhání vyrovnává co nejvíce nestejnoroďost chemického složení oceli pomocí difuze. S vyšší teplotou probíhají difuzní pochody lépe. Zmíněná nestejnoroďost složení oceli vzniká při ochlazování mezi teplotami likvidu a solidu. [3]

Žíhací teploty jsou v rozmezí 1 000 až 1 250 °C do oblasti austenitu. Výdrž na teplotě musí být dostatečně dlouhá - 6 a více hodin a následuje pomalé ochlazování. Při výdrži dochází k vyrovnání chemického složení a zrovnoměření struktury. Současně dochází k oxidaci na povrchu a dochází k oduhličení podpovrchových vrstev. [3]

Po homogenizačním žíhání dostaneme hrubozrnou strukturu, proto musí následovat další zpracování - například normalizační žíhání nebo tváření za tepla. [3]

Normalizační žíhání

Cílem je zjemnění hrubého austenitického zrna. Hrubé zrno vzniká v důsledku pomalého ochlazování z odlévacích teplot nebo při dlouhodobém žíhání za vysokých teplot. [3]

Velikost zrna po normalizačním žíhání bude stejnoměrně velká. Takováto jemnozrná a rovnoměrná struktura disponuje vyšší houževnatostí a pevností a je výhodná pro další tepelné zpracování. [3]

Nejčastěji se normalizačně žíhají podeutektoidní oceli s obsahem uhlíku do 0,8 %. Žíhací teploty jsou v rozsahu od 30 do 50 °C nad teplotou A_{c3} . Ohřev je jednorázový a rychlý. Struktura se mění na austenitickou. Následuje nezbytně dlouhá prodleva pro prohřátí celého objemu materiálu a homogenizace struktury. Potom následuje ochlazování volně na vzduchu. [3]

Výsledná struktura je jemnozrná a tvořena feritem a perlitem. [3]

Izotermické žíhání.

Při izotermickém žíhání se snižují zbytková pnutí a tvrdost. Provádí se pro lepší obrobiteľnosť a tvařitelnost ocelí. Někdy se využívá místo normalizačního žíhání za účelem zkrácení doby žíhání. Z tohoto důvodu se používá pro malé výrobky, u kterých je možný rychlý ohřev. [3]

Žíhací teploty jsou v oblasti austenitu - 30 až 50 °C nad teplotou A_{c3} . Následuje prudké ochlazení na teplotu 600 - 700 °C a na této teplotě výdrž. Během výdrže dochází k izotermické přeměně austenitu na ferit a perlit. Po ukončení přeměny následuje volné ochlazování. [3]

Mezi žihání bez překrytí patří:

Žihání na snížení pnutí.

Žihání ke snížení pnutí se provádí po předchozích operacích, jako jsou tepelné zpracování, svařování, tváření nebo tuhnutí. Nedochozí při něm ke změně struktury ani původních mechanických vlastností. [3]

Ohřevem na teplotu žihání se sníží mez kluzu materiálu pod hladinu vnitřních pnutí. Čím vyšší je teplota, tím více pnutí se odstraní. V materiálu zůstávají pouze pnutí pod mezí kluzu. [3]

Teplota žihání je závislá na zpracovávaném materiálu, ale nesmí překročit teplotu A_{c1} . Pro konstrukční ocel se volí v rozmezí 450 až 650 °C, pro vysokolegované oceli může žihací teplota být až 780 °C. Ohřev musí být pomalý, aby vlivem pnutí nedošlo k porušení materiálu při ohřevu. Výdrž na teplotě musí být dostatečně dlouhá, aby došlo k vyrovnání teplot v celém průřezu součásti. Následuje konečné ochlazování, které musí být také pomalé, aby nevznikala nová pnutí. [3]

Rekrytizační žihání.

Teplota rekrytizace není pro všechny slitiny shodná, odvíjí se od teploty tavení. Obecně se udává vztah

$$T_R = (0,35 \text{ až } 0,45) \cdot T_m, \quad (1)$$

kde T_m je teplota tavení. [3]

Rekrytizační žihání se provádí nejčastěji po tváření za studena a jeho cílem je obnovit vlastnosti materiálu, které měla před tvářením. Obnovuje se schopnost plastické deformace, odstraňují se protažená zrna a vznikají nová feritická zrna. [3]

Žihací teploty pro oceli se pohybují v rozmezí 550 až 700 °C. Při ohřevu dochází už při nízkých teplotách k zotavení materiálu a tím k odstranění zpevnění. Dochází k novému uspořádání dislokací, ale deformovaná zrna zůstávají. Při vyšších žihacích teplotách dochází i k rekrytizaci, ale také k zhrubnutí zrna. [3]

Výdrž na žihací teplotě je krátká - přibližně 1 hodinu a následuje ochlazení. [3]

Žihání naměkko.

Cílem žihání naměkko je získat lepší obrobiteľnosť alebo tvařitelnost za studena. Získávají se vhodné mechanické vlastnosti. Získáváme vhodnou strukturu pro následující strukturu - lamelární perlit se mění na globulární. [3]

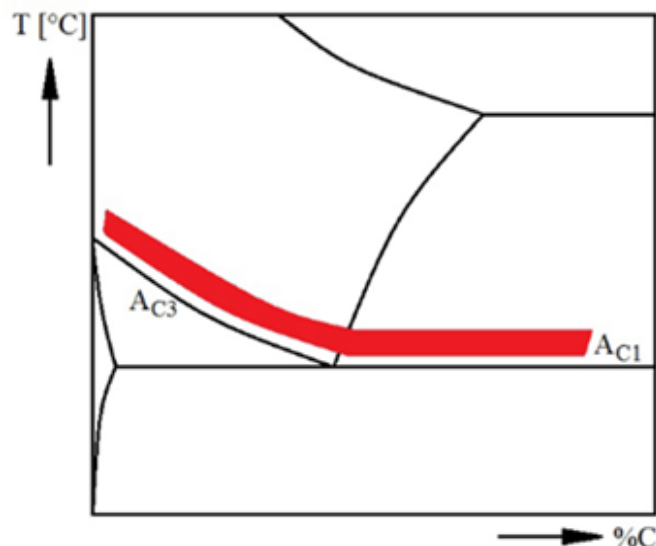
U nízkoлегovaných ocelí a ocelí s obsahem uhlíku do 0,8 % probíhá ohřev na teplotu pod A_{c1} a následuje výdrž a pomalé ochlazování. Při příliš dlouhé výdrži dochází ke zhrubnutí útvarů cementitu. [3]

U vysokolegovaných ocelí a ocelí s vyšším obsahem uhlíku se žihá při teplotách nad A_{c1} a výdrž je 2 až 3 hodiny. Čím pomalejší je následné ochlazování, tím hrubší jsou karbidy a výsledná tvrdost nižší. [3]

2. 1. 2. Kalení

Kalení je jedno z nejpoužívanějších tepelných zpracování. Kalená součást se při něm ohřívá na kalicí teplotu (viz obrázek 2. 3). Výdrž na kalicí teplotě se pohybuje v řádu jednotek až desítek minut, následně je součást ochlazena.

Rychlost ochlazování záleží na způsobu kalení a na chemickém složení oceli. Zároveň na rychlosti ochlazování závisí stav struktury po kalení.

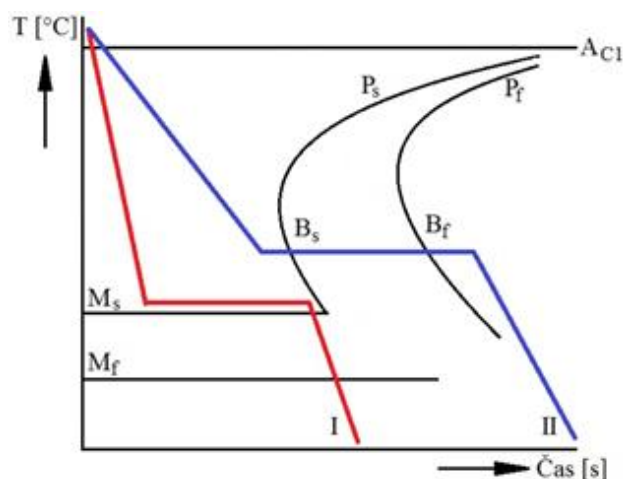


Obrázek 2. 3 Pásmo kalicích teplot v diagramu Fe-Fe₃C [5]

Kalení může být martenzitické nebo bainitické. Na obrázku 2. 4 jsou zobrazeny křivky ochlazování. Modrá křivka je pro bainitické kalení, červená pro martenzitické.

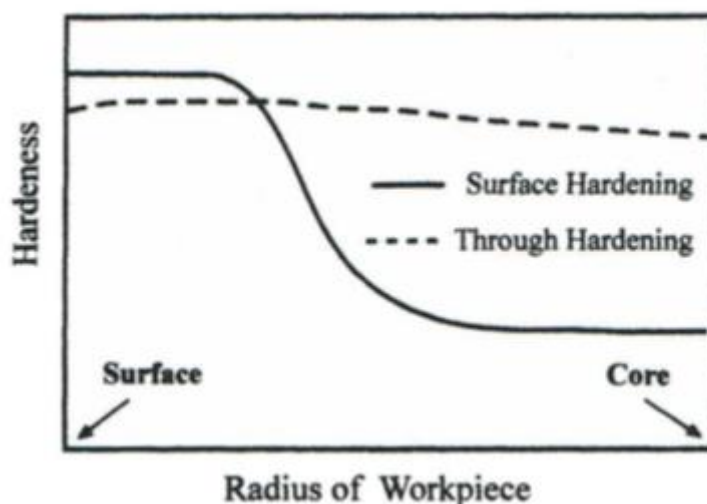
U bainitického kalení je ochlazování dvoustupňové – ocel se ochlazuje například v roztavené soli, která má max. 300 °C a následuje výdrž na této teplotě, zatímco vzniká bainitická struktura. Po dosažení struktury bainitu následuje dochlazení. [1]

Martenzitické kalení vyžaduje intenzivnější ochlazování – ocel se chladí nejčastěji vodu nebo olejem – záleží na konkrétní oceli a potřebné rychlosti.



Obrázek 2. 4 Křivky ochlazování pro kalení v ARA diagramu [5]

Nejběžnější metody indukčního kalení jsou povrchové kalení, objemové kalení a selektivní kalení. U povrchového kalení je cílem vytvořit martenzitickou strukturu na povrchu dílu. Díky tomu získá materiál v zakalené vrstvě lepší mechanické vlastnosti - větší povrchovou tvrdost. Jako hloubka zakalené vrstvy se počítá hloubka materiálu s obsahem martenzitu vyšším než 50 %. Rozdíl tvrdosti mezi zakalenou vrstvou a nezakaleným jádrem je velký (viz plná čára na obrázku 2. 5). [6]



Obrázek 2. 5 Průběh tvrdosti podle vzdálenosti od povrchu [6]

Při objemovém kalení je cílem získat martenzitickou strukturu nejen v povrchové vrstvě, ale v celém průřezu. Ohřev musí být nad austenitizační teplotu s dostatečnou prodlevou, aby došlo k ohřátí celého průřezu, a následuje prudké ochlazení. Schopnost materiálu dosáhnout prokalení v celém průřezu závisí na prokalitelnosti materiálu, na kalicích podmínkách, na geometrii součásti a na tepelné

vodivosti materiálu. Prokalitelnost materiálu je ovlivněna chemickým složením materiálu. [5]

Průběh tvrdosti podle vzdálenosti od povrchu pro objemové kalení je znázorněn na obrázku 2. 5 čerchovanou čarou.

U selektivního kalení je kalena pouze jedna část součásti. Tato metoda se používá v případech, kde potřebujeme získat požadované mechanické vlastnosti jen v jedné části, zbytek součásti zůstane nedotčený. Výhodou je úspora času a energie. [5]

2. 1. 3. Popouštění

Po kalení pravidelně následuje popouštění. Zakalená struktura je martenzitická, tedy tvrdá, křehká a náchylná ke vzniku trhlin. Popouštění se používá pro zvýšení houževnatosti, plasticity a vlastní napjatosti, přičemž se nesníží tvrdost. Po indukčním kalení může popouštění probíhat konvenční metodou v peci, indukčním popouštěním nebo vnitřním teplem. [60]

Konvenční popouštění je stejné pro indukční kalení jako pro konvenční kalení. Rozlišujeme 4 stádia popouštění podle popouštěcích teplot.

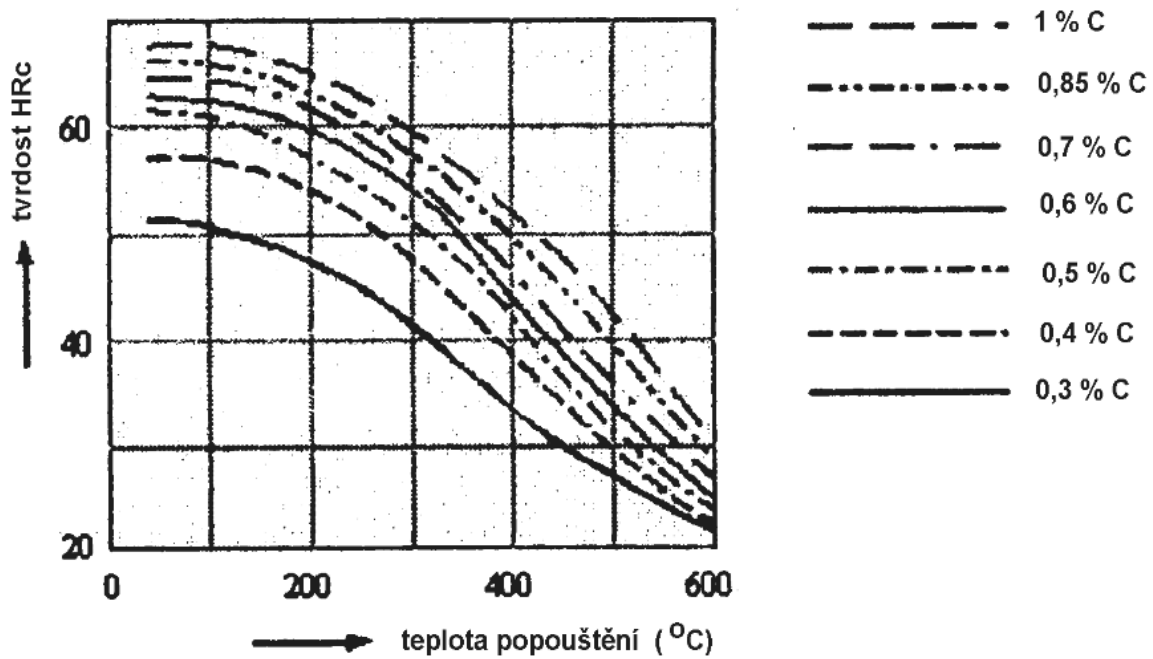
První stádium probíhá při popouštěcích teplotách do 200 °C a dochází během něj k rozpadu tetragonálního martenzitu na nízkouhlíkový martenzit kubický a na nerovnovážný karbid ϵ ($Fe_{2,4}C$) s těsně uspořádanou hexagonální mřížkou. První stádium je spojeno s mírným poklesem tvrdosti. [1]

Druhé stádium je pro popouštěcí teploty od 200 do 300 °C. Zbytkový austenit se rozpadá na bainit. Podle obsahu zbytkového austenitu se snižuje nebo zvyšuje tvrdost. [1]

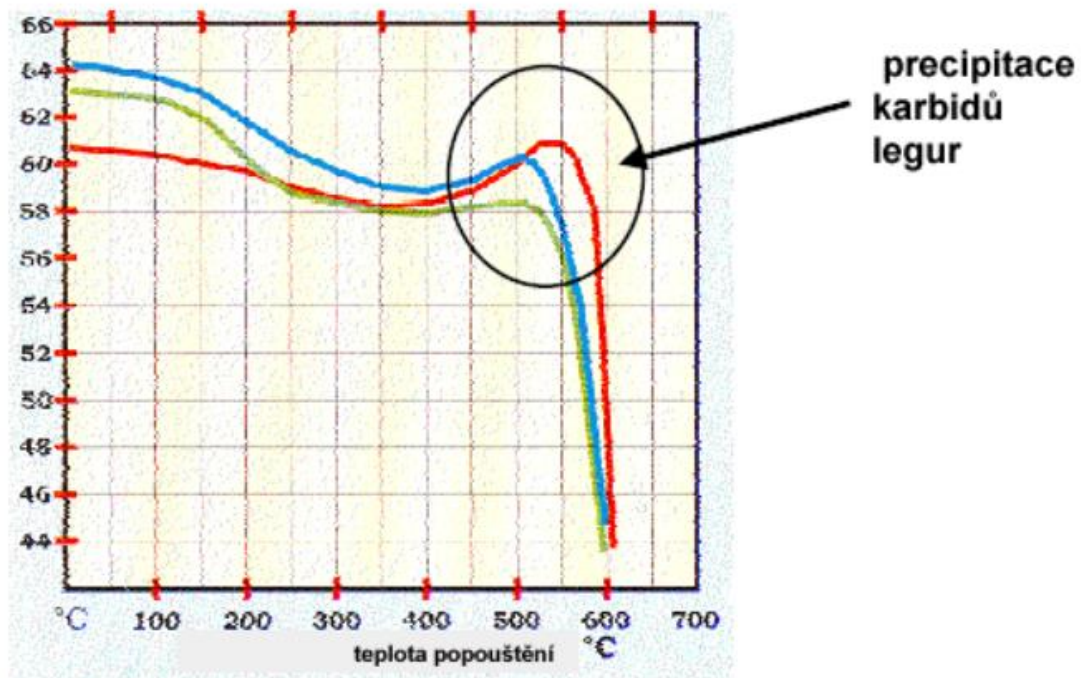
Třetí stádium probíhá od 300 do 500 °C. Rozpadá se nízkouhlíkový martenzit na ferit a tvoří se cementit. Klesá tvrdost a pevnost. [1]

Čtvrté stádium je při popouštěcích teplotách nad 500 °C. Dochází k hrubnutí částic cementitu a martenzitický ferit ztrácí jehlicovitou podobu. U vysokolegovaných ocelí precipitují speciální karbidy a tím se zvyšuje tvrdost oceli – sekundární tvrdost (viz obrázek 2. 7). [1] [7]

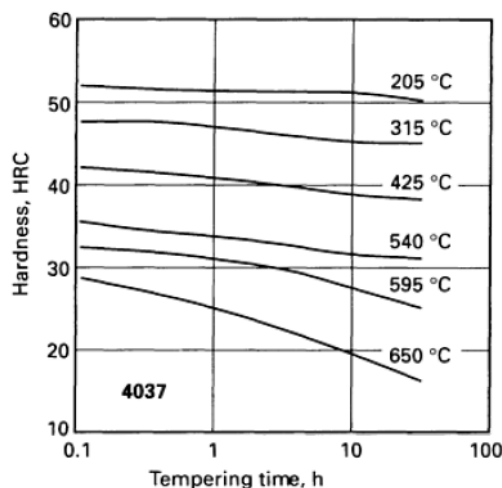
Vliv popouštěcí teploty na tvrdost HRC je uveden na obrázku 2. 6.



Obrázek 2. 6 Vliv popouštěcí teploty na tvrdost HRC pro různé obsahy C [4]



Obrázek 2. 7 Sekundární tvrdost při popouštění [7]

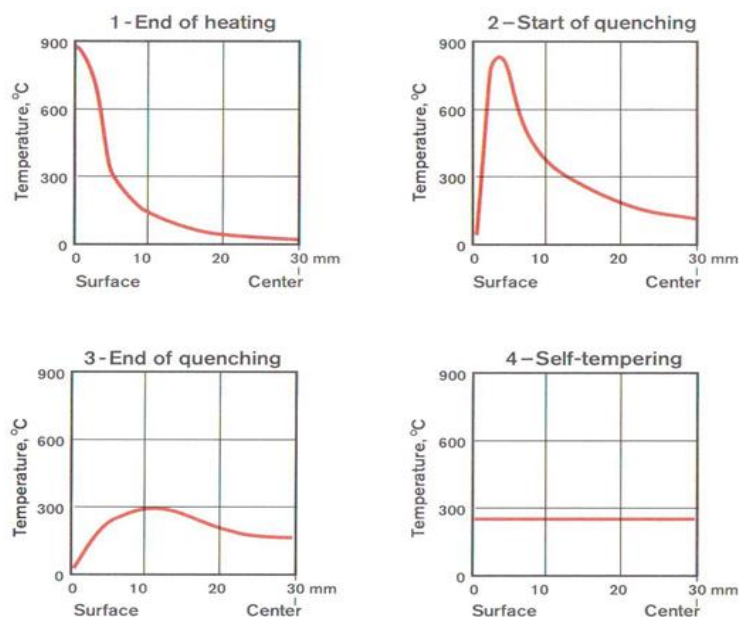


Obrázek 2. 8 Vliv doby popouštění na tvrdost materiálu [8]

Na obrázku 2. 8 je závislost tvrdosti na popouštěcí době pro ocel AISI 4037, její ekvivalent je DIN 1.5432 a podle evropských norem 42MnMo7. Ze závislosti je patrné, že nevhodnější doba popouštění je 1,5-2 hodiny. [8]

Popouštění vnitřním teplem využívá rozdílných teplot povrchu a jádra, průběh procesu je znázorněn na obrázku 2. 9. Při kalení je povrch ochlazován rychleji než jádro. To vede k tomu, že po ukončení ochlazování je teplota jádra větší než teplota povrchové vrstvy. Následně dochází k přenosu tepla z jádra na povrch. Při vhodných parametrech procesu kalení je teplota jádra v rozmezí 210 - 240 °C. [6]

Tento způsob je vhodný pro velké a tvarově jednoduché součásti, nejlépe symetrické. U tvarově složitých součástí může mít jádro v různých částech dílu rozdílnou teplotu a v těchto částech může popouštění probíhat odlišně. [6]



Obrázek 2. 9 Ohřev vnitřním teplem [6]

2. 1. 4. Vnitřní pnutí a trhliny při tepelném zpracování

Při kalení dochází ke vzniku vnitřních pnutí. Ta mohou být dvojje – tepelná a strukturní.

Tepelná pnutí jsou způsobena velkým tepelným gradientem během rychlého ohřevu a ochlazování při indukčním kalení. Tepelná pnutí způsobují plastickou deformaci, hlavně na povrchu tělesa. Tato plastická deformace má vliv na konečnou velikost vnitřního pnutí. [6]

Strukturní vnitřní pnutí jsou způsobena proběhnutými fázovými změnami martenzitu na austenit (popřípadě bainit). Martenzitická struktura s tetragonální tělesně centrovanou strukturou se vytvoří nejdříve na povrchu, zatímco v jádře je ještě kubická plošně centrovaná struktura. Struktura martenzitu stlačuje uprostřed strukturu austenitu. Martenzit, který se rozpíná od povrchových vrstev dál, brání přeměně zbytkového austenitu na martenzit. [9]

Vhodnou kombinací obsahu uhlíku a legujících prvků můžeme dosáhnout minimální deformace tím, že se podaří vyrušit tahová a tlaková vnitřní pnutí. Takový typ oceli se nazývá bezdeformační. [9]

2. 2. Indukční ohřev

2. 2. 1. Historie

Základ indukčního ohřevu položil v roce 1831 Michael Faraday objevem elektromagnetické indukce a indukčního zákona. Zákon se týká indukovaného elektromotorického napětí v magnetickém obvodu způsobeným změnou magnetického indukčního toku. [10]

Vztah pro elektromotorické napětí je:

$$U_i = \frac{d\Phi}{dt}. \quad [11] \quad (2)$$

Nezávisle na M. Faradayovi objevil elektromagnetickou indukci Joseph Henry v roce 1832. [11]

Vztah mezi magnetickým a elektrickým polem popsal James Clerk Maxwell v roce 1865 čtyřmi rovnicemi (viz obrázek 2. 10). [11]

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \gamma \mathbf{E} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\operatorname{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\operatorname{div} \mathbf{E} = 0$$

$$\operatorname{div} \mathbf{B} = 0$$

Obrázek 2. 10 Maxwellovy rovnice v diferenciálním tvaru [11]

Ve strojírenství byl indukční ohřev využíván poprvé na konci 19. století pro tavení v kanálkových a kelímkových pecích.

S objevem polovodičových frekvenčních měničů dosáhl indukční ohřev svého největšího rozmachu.

2. 2. 2. Princip indukčního ohřevu

Indukční tepelné zpracování využívá vzniku tepla přímo v materiálu – jde o přímý ohřev. Na rozdíl od nepřímého ohřevu je přímý ohřev lokální. To znamená, že tepelně ovlivněná oblast je minimální.

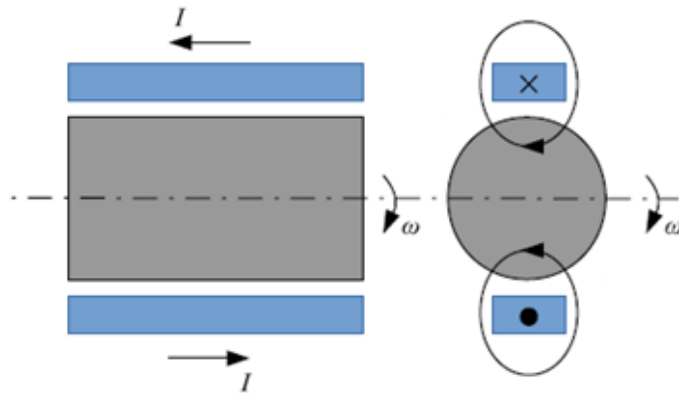
Indukce je přímou aplikací Lenzova a Jouleova zákona. [12]

Lenzův indukční zákon formuloval německý fyzik Heinrich Lenz. Podle tohoto zákona totiž existuje v každém elektrickém vodiči umístěném do proměnného magnetického pole elektromotorická síla, a tedy v něm vznikají indukované proudy zvané vířivé proudy. [12]

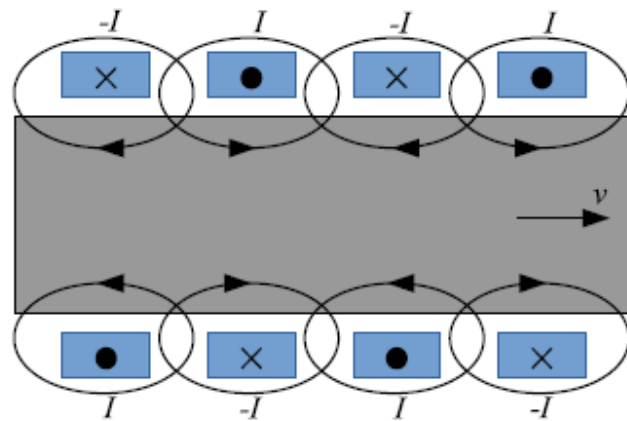
Jouleův zákon, který formuloval anglický fyzik James Prescott Joule, vyjadřuje vztah mezi elektrickou a tepelnou energií. Jouleovo teplo je teplo vznikající na vodiči průchodem elektrického proudu. [12]

Pro uskutečnění indukčního ohřevu je nutné vybudování proměnného magnetického pole uvnitř ohřivaného předmětu. Toho lze dosáhnout dvěma způsoby.

Jednou možností je využít rotace nebo posuvu vsázky v časově neproměnném magnetickém poli. Zdrojem mohou být permanentní magnety (obrázek 2. 11) nebo cívky, kterými protéká stejnosměrný elektrický proud (obrázek 2. 12). [13]

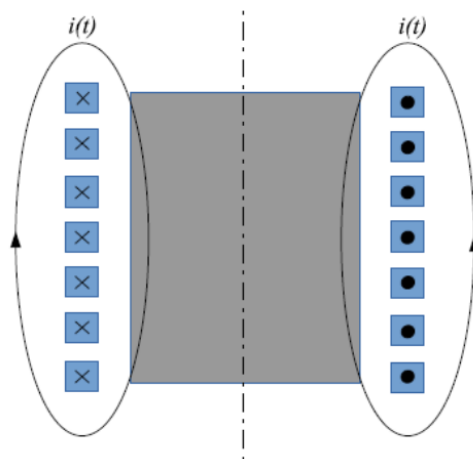


Obrázek 2. 11 Rotační indukční ohřev [13]



Obrázek 2. 12 Posuvný indukční ohřev [13]

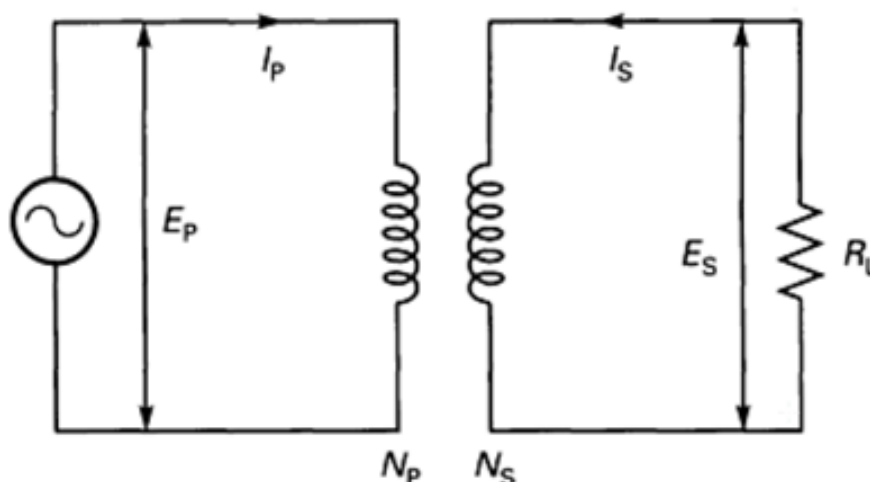
Druhý způsob je častější, jde o ohřev pomocí proměnného magnetického pole. Využívá se k tomu induktor, kterým protéká střídavý proud, viz obrázek 2. 13. [12]



Obrázek 2. 13 Indukční ohřev v proměnném magnetickém poli [13]

Induktor je elektrický vodič (cívka) vyrobený nejčastěji z mědi. Přivedením střídavého proudu vzniká v okolí induktoru magnetické pole. [12]

Dvojice induktor-vsázka představuje analogii transformátoru (obrázek 2. 14). Induktor plní funkci primáru transformátoru a vsázka sekundáru transformátoru s jedním závitem. Některé vlastnosti transformátorů mohou být užitečné při navrhování induktorů. Platí, že proud v primáru transformátoru násobený počtem primárních závitů je roven proudu v sekundáru násobenému počtem sekundárních závitů. Účinnost vazby mezi vinutími je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi nimi. [13]



Obrázek 2. 14 Náhradní schéma indukčního ohřevu [8]

Pokud vznikne proměnné magnetické pole, začnou se indukovat vířivé proudy uvnitř vsázky (součástí) umístěné uvnitř induktoru. Tyto vířivé proudy mají stejnou frekvenci jako elektrický proud v cívce, jen mají opačný směr. Ve vsázce vzniká teplo podle Jouleova zákona. [13]

Teplo ve vsázce se nevyvíjí rovnoměrně v celém průřezu – tento jev se nazývá Skin efekt. Skin efekt popisuje rozložení většiny tepla do slabé povrchové vrstvy, která se nazývá hloubka vniku (hloubka průniku). Rozměr této povrchové vrstvy se snižuje s rostoucí frekvencí primárního magnetického pole, s elektrickou vodivostí a permeabilitou vsázky. Elektrická vodivost a permeabilita nejsou konstantní a jsou závislé na teplotě. [6]

S rostoucí teplotou se bude zvyšovat hloubka průniku elektromagnetického pole, ale se vzrůstající frekvencí se bude hloubka průniku elektromagnetického pole snižovat. [6]

Hloubka průniku elektromagnetického pole se počítá do 37 % proudové hustoty (viz obrázek 2. 15) podle vztahu na následující stránce.

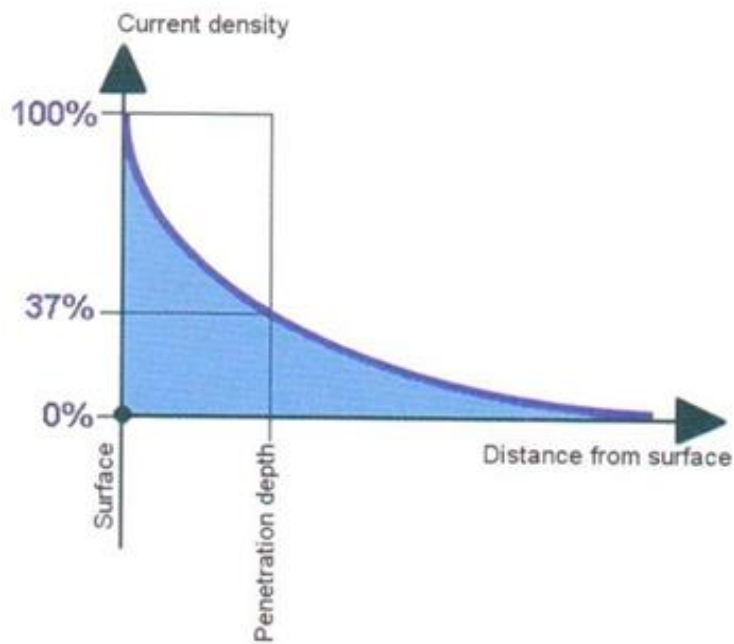
$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}} \quad [6] \quad (3)$$

δ - hloubka průniku elektromagnetického pole [m]

ρ - měrný elektrický odpor [$\Omega \cdot m$]

μ - relativní permeabilita

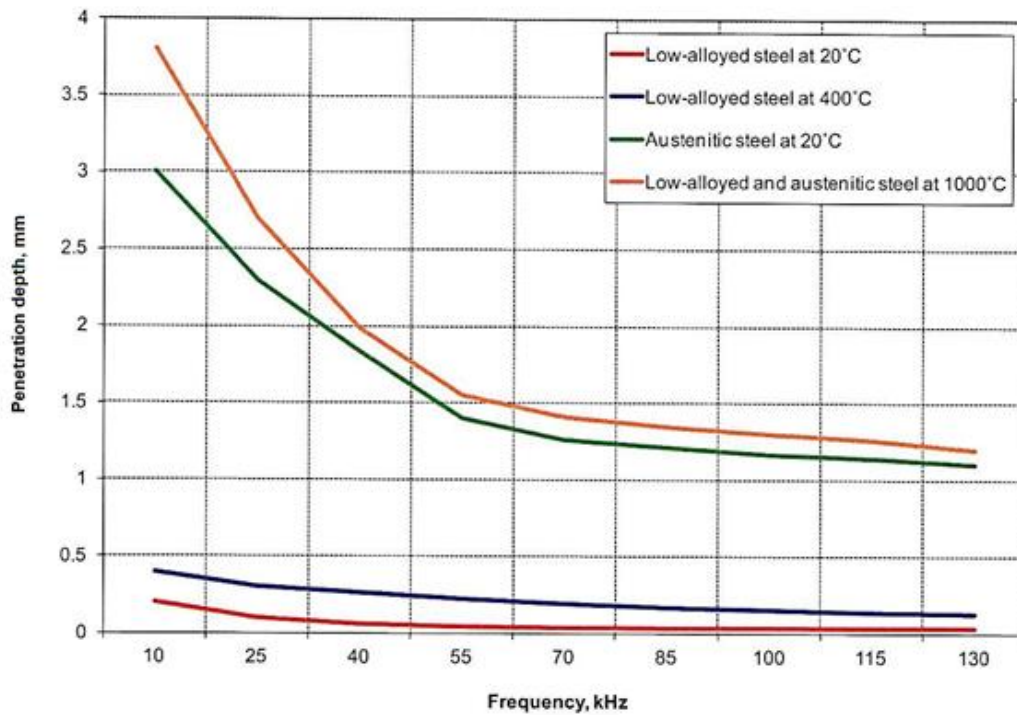
f - frekvence [Hz]



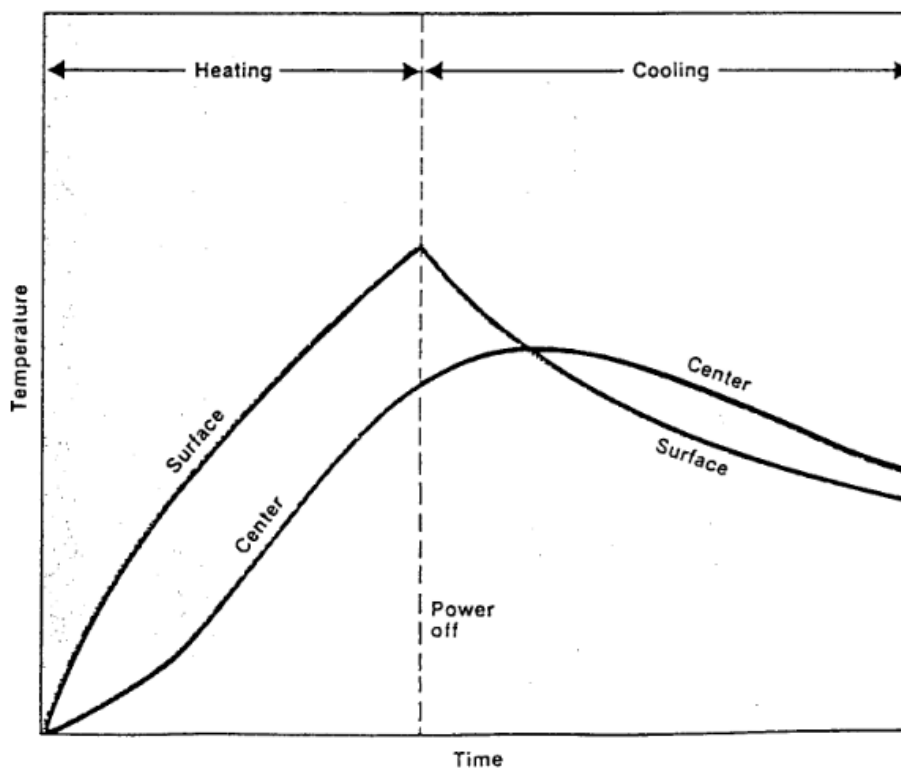
Obrázek 2. 15 Závislost hustoty elektrického proudu na vzdálenosti od povrchu [6]

Dále je hloubka průniku závislá na chemickém složení. U nízkolegovaných ocelí je hloubka průniku při stejné teplotě nižší než u austenitických ocelí, viz obrázek 2. 16. [6]

Porovnání teplotních průběhů v povrchové vrstvě a v jádře povrchově kaleného dílu je uveden na obrázku 2. 17.



Obrázek 2. 16 Závislost hloubky průniku na frekvenci pro různé materiály [6]



Obrázek 2. 17 Průběh teplot při indukčním ohřevu v jádře a na povrchu [14]

2. 2. 3. Volba frekvence

Na zvolené frekvenci záleží hloubka prokalení, proto je volba frekvence důležitá. Z rovnice (3) pro hloubku průniku elektromagnetického pole vyplývá, že hloubka průniku je závislá na frekvenci, měrném elektrickém odporu a relativní permeabilitě. Je nutné rozlišit hloubku průniku elektromagnetického pole a požadovanou hloubku kalené vrstvy X_{hD} (obrázek 2. 18). [6]

$$\left(\frac{5}{X_{hD}}\right) < \text{Frekvence [kHz]} < \left(\frac{16}{X_{hD}}\right)$$

$$\text{Frekvence} = \left(\frac{8,5}{X_{hD}}\right)^2$$

Obrázek 2. 18 Orientační hodnota frekvence [6]

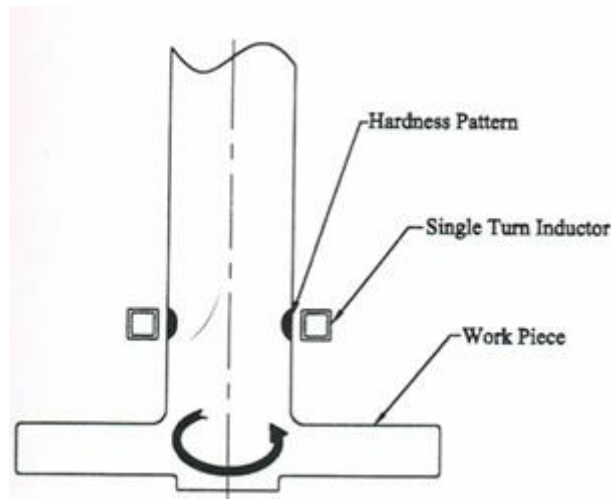
Požadované hloubky zakalení můžeme dosáhnout vhodnou kombinací frekvence a proudové hustoty. Pro nižší hloubky lze použít nižší než doporučenou frekvenci při vyšší proudové hustotě a kratším čase ohřevu. Pro hlubší vrstvu můžeme použít vyšší frekvenci při nižší proudové hustotě a delším čase ohřevu. Například pro prokalení celého objemu se může frekvence pohybovat od 500 do 80 000 kHz. [6]

Délka ohřevu má vliv na výslednou strukturu. Při velmi rychlém ohřevu se ohřívá jen oblast v působnosti vířivých proudů, při tom můžeme pozorovat rozdíl teplot v jádře a v povrchové vrstvě vsázky (obrázek 2. 17). Ve výsledku je rozdíl také v mechanických vlastnostech povrchové vrstvy a jádra. Při pomalejším ohřevu se ohřívá i jádro. Důležité je najít co nejkratší vhodnou dobu ohřevu, kdy bude materiál prokalen do dostatečné hloubky. [6]

2. 2. 4. Ohřev vsázky

Ohřev vsázky může být jednorázový statický, kontrolovaný nebo průběžný, anebo pulzní. [6]

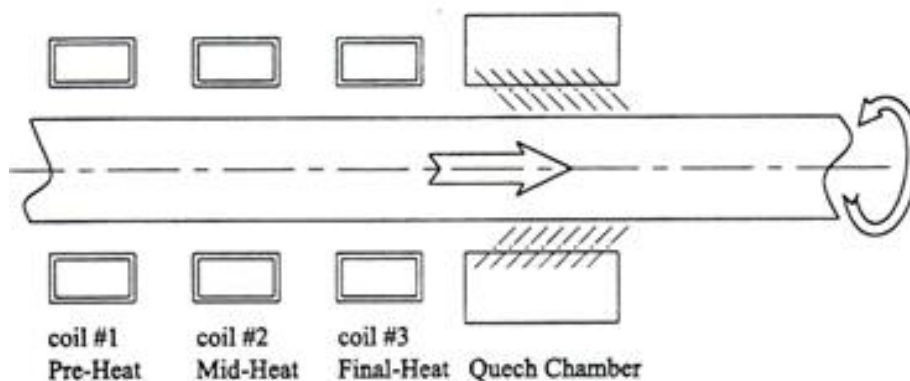
Jednorázový statický ohřev se používá většinou u selektivního kalení. Vsázka se vloží do induktoru, kde je ohřívána na austenitizační teplotu. Následně je jednorázově zakalena buď ponořením induktoru do vodní lázně, nebo je ohřívána vsázka ochlazena vodní sprchou. Rotační součásti se zpravidla ohřívají a kalí za rotace. [6]



Obrázek 2. 19 Jednorázový statický ohřev [6]

U kontrolovaného ohřevu je součást upnuta v přípravku a umístěna v induktoru (obrázek 2. 19). Při ohřevu se začne součást pohybovat. Tím je možné kontrolovat rychlost a lokaci ohřevu. Dosáhneme tím různého ohřívání v odlišných částech součásti. [6]

Průběžný ohřev se používá většinou pro dlouhé díly (hřídele, tyče, ...) – viz obrázek 2. 20. K ohřevu se používá postupně několik induktorů. Induktory mohou být stejné, se stejnou frekvencí a výkonem, nebo může být každý jiný, v závislosti na použití. U materiálů se sklonem ke vzniku trhlin je vhodné použít i induktory k předehřevu. [6]



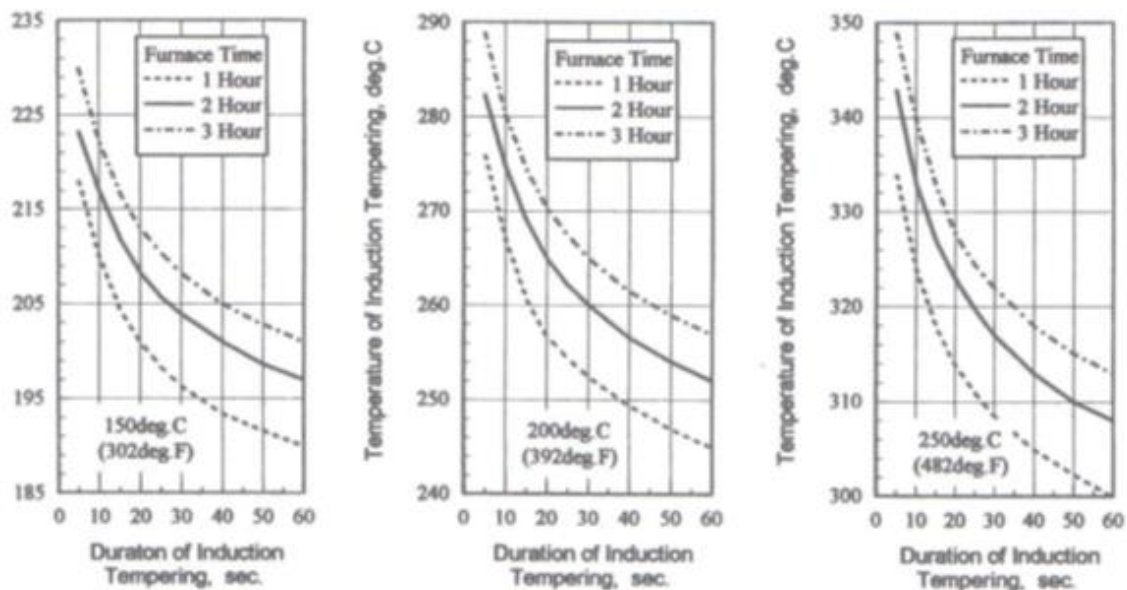
Obrázek 2. 20 Průběžný ohřev [5]

Další možností je pulzní ohřev, který využívá krátkých tepelných rázů. Díky tomu můžeme kontrolovat, případně udržovat, teplotu povrchu bez přehřátí. Nebo se používá dvoufrekvenční ohřev. Předehřev se provádí s nízkou frekvencí a tepelných rázů se dosahuje vysokou frekvencí. Délka každého pulzu závisí na tvaru a velikosti

vsázky, ale pohybuje se od 0,2 do 3 sekund. Pulzní způsob se používá pro vysokouhlíkové oceli a litiny se sklonem k vytváření trhlin. [6]

2. 3. Indukční popouštění

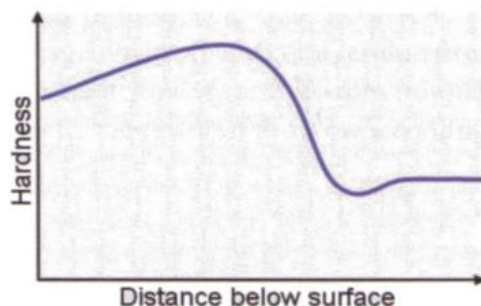
Základní rozdíl mezi konvenčním a indukčním popouštěním je v době trvání (viz obrázek 2. 21).



Obrázek 2. 21 Porovnání doby konvenčního a indukčního popouštění [6]

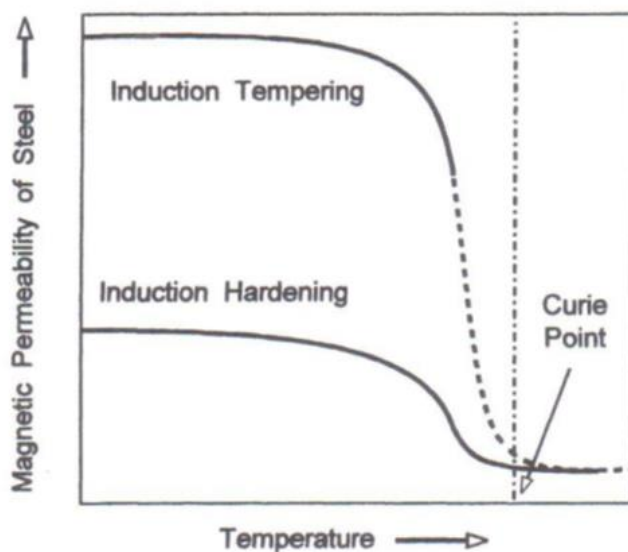
U indukčního popouštění je třeba zvolit vhodné stádium (teplotu) popouštění a podle toho frekvenci a tvar induktoru. Popouštěcí teploty jsou nižší než Curieho bod, proto je materiál magnetický i po popouštění. Při ohřevu vířivými proudy musíme brát v úvahu teplo vznikající hysterezními ztrátami. [6]

Je možné použít pro indukční popouštění stejnou metodu i induktor jako pro kalení. Ale u popouštění je hloubka průniku elektromagnetického pole menší, a tak je potřeba zvýšit čas ohřevu. Velmi krátký čas ohřevu by mohl způsobit přetrvání nepopouštěného martenzitu pod povrchem, což by mohlo způsobit vnitřní pnutí. To by mohlo vést k náhlému poklesu tvrdosti materiálu – viz obrázek 2. 21.



Obrázek 2. 22 Náhlý pokles tvrdosti v jádře [6]

V případě, kdy je požadována nižší frekvence než u indukčního kalení, není možné použít stejné zařízení jako u indukčního popouštění. Důvod je ten, že teploty jsou u popouštění pod Curieho bodem a materiál je feromagnetický, tak je relativní permeabilita až 10krát vyšší než u kalení, kdy v poslední fázi ohřevu máme austenitickou a paramagnetickou strukturu, což vede k menší velikosti intenzity magnetického pole. Z toho důvodu je menší i velikost hloubky vířivých proudů. [6]



Obrázek 2. 23 Závislost permeability na teplotě [6]

Z rovnice pro hloubku průniku elektromagnetického pole (rovnice 3) na straně 23 vyplývá, že s větší permeabilitou je hloubka průniku nižší. Závislost permeability na teplotě je zobrazena na obrázku 2. 23.

Ohřev u indukčního popouštění probíhá rychleji než u konvenčního popouštění, proto musí být zvýšena popouštěcí teplota, aby se dosáhlo stejného snížení tvrdosti. [6]

2. 4. Induktory

Induktor je pracovní nástroj (prostředí), ve kterém probíhá indukční ohřev. Konstrukčně je induktor elektrický vodič (cívka) vyrobený nejčastěji z mědi. Přivedením střídavého proudu vzniká v okolí induktoru magnetické pole.

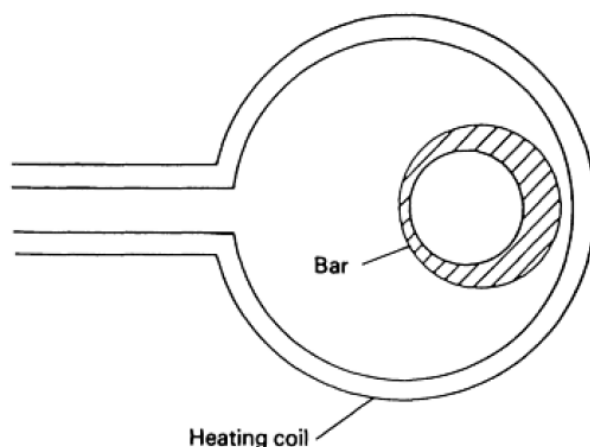
Jak již bylo uvedeno v bodě 2.2.2., dvojice induktor-vsázka představuje analogii transformátoru, kde induktor plní funkci primáru transformátoru a vsázka sekundáru transformátoru s jedním závitem. [13]

Podle vlastností transformátorů platí, že proud v primáru transformátoru násobený počtem primárních závitů je roven proudu v sekundáru transformátoru násobenému počtem sekundárních závitů. Účinnost vazby mezi vinutími je nepřímo úměrná vzdálenosti mezi nimi. [13]

Podle vlastností transformátorů existuje několik zásad pro návrh induktorů. Induktor by měl být přiblížen vsázce tak, aby co největší počet siločar protínal vsázku v místě, kde má být ohřívána. [13]

Magnetické pole se soustředí uprostřed válcového induktoru, kde je největší magnetická indukce. Díky tomu bude v těchto místech zajištěn rychlý ohřev. [12]

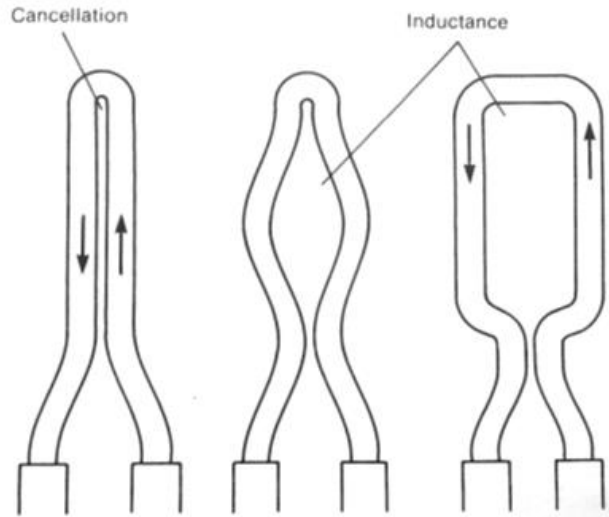
V geometrickém středu válcového induktoru bude tok slabý, proto je lepší součást umístit mimo geometrický střed, blíže k závitům, kde bude silnější pole a bude se ohřívát na vyšší teplotu a vyšší rychlostí - viz obrázek 2. 24. [13]



Obrázek 2. 24 Umístění součásti v induktoru [8]

V místě, kde se vodiče a induktor spojují, je magnetické pole slabší, proto magnetický střed induktoru nutně nemusí být ve stejném bodě jako geometrický střed. Tento jev se projevuje nejvíce u jednozávitových induktorů. Ale větší počet závitů induktoru zvyšuje tok, pak tedy tato zásada ztrácí důležitost. [5]

Induktor musí být navržen tak, aby nedocházelo k vyrušení pole magnetické indukce od opačných stran induktoru. Na obrázku 2. 25 vlevo je zobrazena špatná konstrukce, protilehlé strany jsou umístěny příliš blízko u sebe. Schéma vpravo na stejném obrázku zobrazuje lepší variantu. [5]



Obrázek 2. 25 Vliv konstrukce induktoru na indukčnost [8]

Induktor je zevnitř chlazený vodou. Na obrázku 2. 26 vpravo je vidět přívod vodního chlazení. Voda protéká uvnitř závitů induktoru.



Obrázek 2. 26 Induktor pro ohřev vnějších průměrů

2. 4. 1. Nízkofrekvenční ohřev

Jako nízkofrekvenční ohřev se označují metody indukčního tepelného zpracování s frekvencí do 50 kHz. Je vhodný pro ohřev kovů, obzvláště v případě velkých a jednoduchých průřezů. Induktory pro nízkofrekvenční ohřev mají tvar kulatiny nebo čtverce s kulatými rohy. [12] [13]

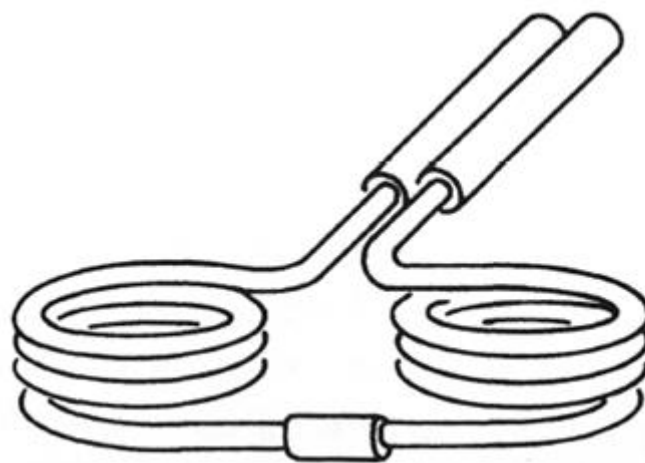
Nízkofrekvenční induktory jsou obecně větší a mají větší počet závitů. [13]

2. 4. 2. Středofrekvenční a vysokofrekvenční ohřev

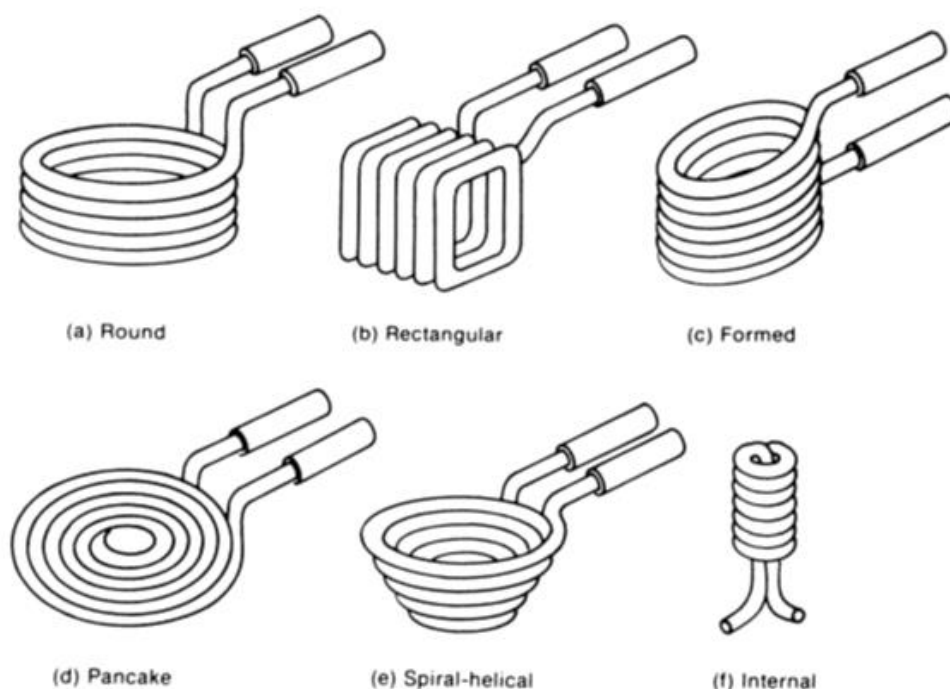
Středofrekvenční a vysokofrekvenční ohřev používá frekvenci 50 až 500 kHz. Induktory mohou být jednozávitové (obrázek 2. 27) i vícezávitové (obrázek 2. 28).



Obrázek 2. 27 Induktor pro ohřev vnějších rozměrů [zdroj: společnost P-COM spol. s r.o.]



Obrázek 2. 28 Vícezávitový induktor [8]



Obrázek 2. 29 Vícezátivé induktoři různých tvarů [8]

Na obrázku 2. 29 f) je varianta induktoru pro vnitřní ohřev.

2. 4. 3. Vnitřní ohřev

Jedním z problémů indukčního ohřevu je ohřev vnitřních ploch. Pro různé frekvence existuje minimální vnitřní rozměr, který lze ohřát. Například pro frekvenci 450 kHz je nejmenší vnitřní průměr 11 mm, který může být ohříván, pro frekvenci 10 kHz je nejmenší vnitřní průměr 25 mm. [13]

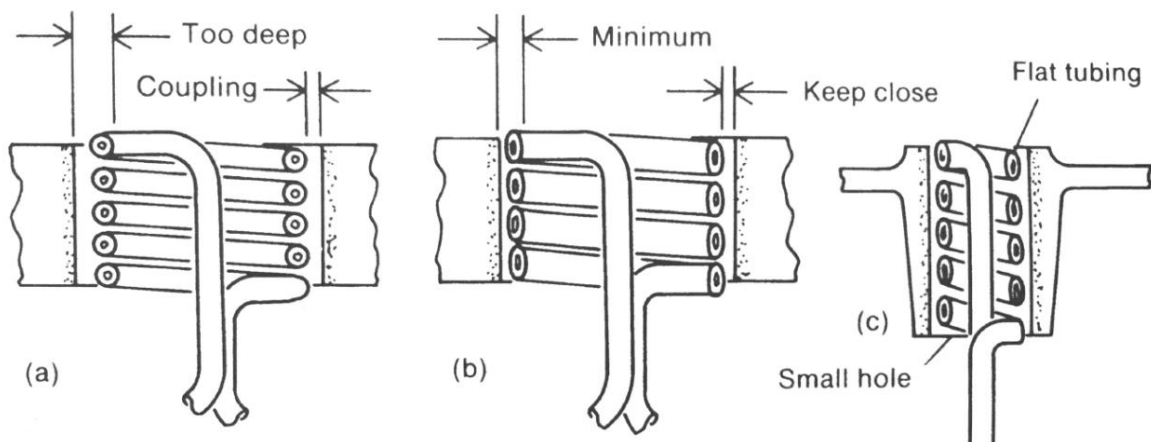
Průřez induktoru by měl být co nejmenší, stejně jako vzdálenost mezi induktorem a vnitřním povrchem, protože proud prochází po vnitřní straně induktoru. Ideální vzdálenost vnitřního průměru od induktoru je 1,6 mm, reálná vzdálenost by se jí měla co nejvíce blížit. [13]

Na obrázku 2. 30 je zobrazena konstrukce induktoru pro vnitřní ohřev. Vlevo je příliš velká mezera mezi induktorem a vnitřním průměrem. Uprostřed je upravená konstrukce, kde je mezera snížena na minimum. [13]

Zvýšení hustoty toku se dosáhne zvýšením počtu závitů nebo jemnější roztečí. Zároveň výška induktoru by neměla být větší než dvojnásobek jeho průměru. [13]

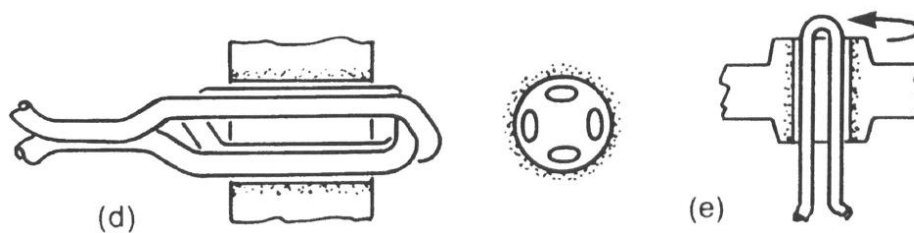
Využívat trubky malých rozměrů je nutnost u induktorů pro vnitřní ohřev, neboť chlazení induktoru je do určité míry omezeno. Pro ohřev malých hloubek potřebují induktoři vysoký výkon generátoru, protože mají poměrně nízkou indukčnost. Protože induktorem protékají vysoké proudy a z povrchu vsázky

vyzařuje teplo, využívá se samostatného vysokotlakého chlazení pro dosažení optimálního průtoku. [13]



Obrázek 2. 30 Induktor pro vnitřní ohřev [13]

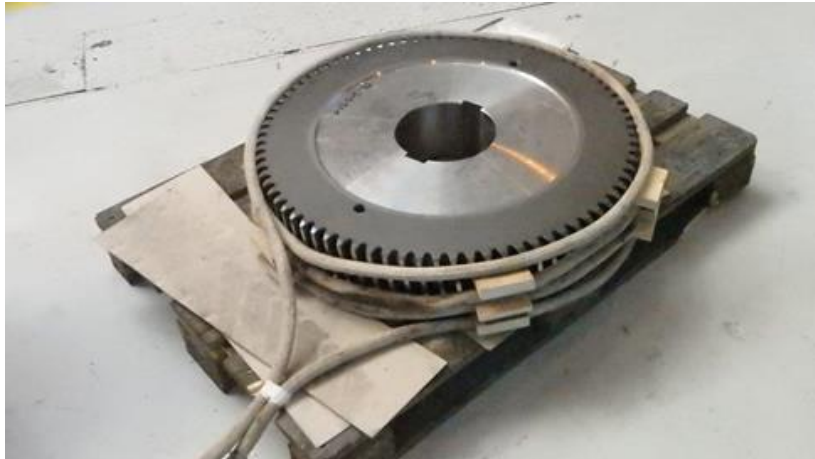
Na obrázku 2. 31 jsou zobrazeny speciální konstrukce induktorů pro vnitřní ohřev. Induktor vlevo se skládá ze 4 svislých pásů a vsázka by se měla kvůli rovnoměrnému ohřevu otáčet. [13]



Obrázek 2. 31 Speciální konstrukce pro vnitřní ohřev [13]

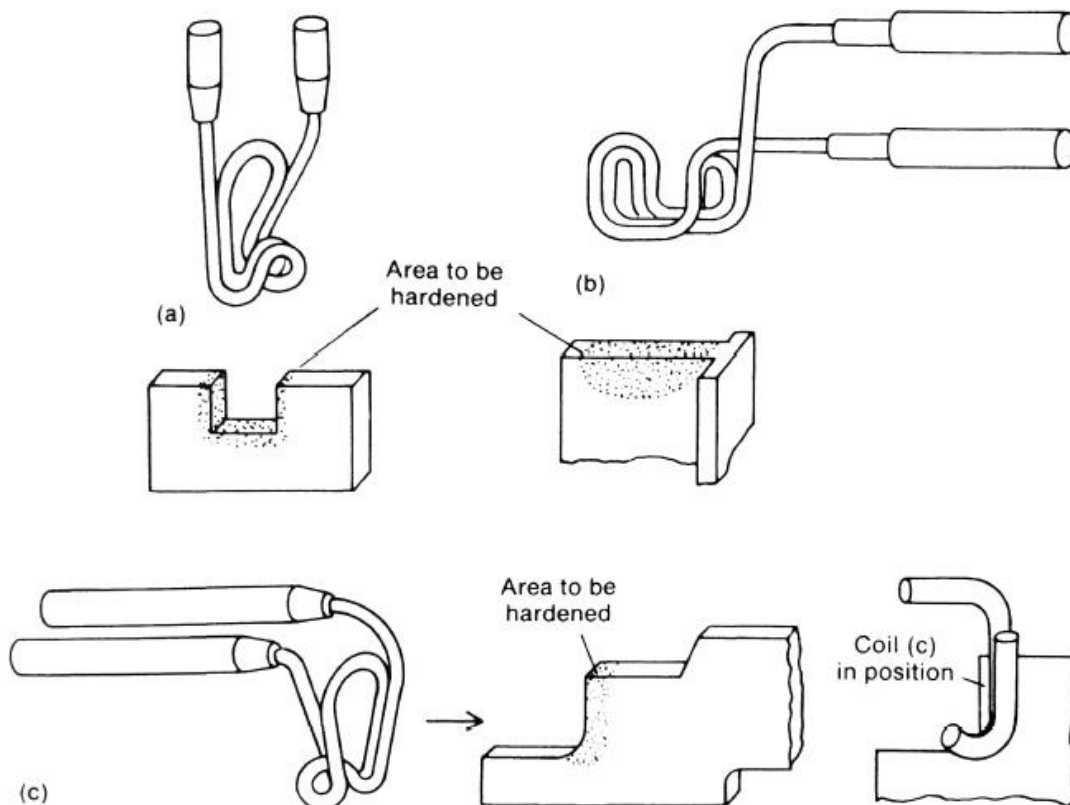
2. 4. 4. Speciální konstrukce induktorů

Induktory jsou vyráběny na míru, dle potřeby zákazníka pro konkrétní vyráběné součásti – například na obrázku 2. 32 je foto flexibilního induktoru pro ohřev velkých součástí.



Obrázek 2. 32 Flexibilní induktor pro indukční ohřev velkých součástí
[zdroj: společnost P – COM spol. s r.o.]

Speciální konstrukci vyžadují induktory pro lokalizovaný ohřev. Konstrukce jsou obdélníkové a konce často zahnuté tak, že vytváří most (viz obrázek 2. 33). Oblasti součástí, které budou kaleny, budou umístěny ve středu induktoru = v místě největšího toku. [13]



Obrázek 2. 33 Speciální induktory pro lokalizovaný ohřev [13]

3. Cíl diplomové práce

Diplomová práce se zabývá procesem indukčního vysokoteplotního popouštění na současném zařízení.

Cílem diplomové práce je provést pracovní cyklus sériového dílu Achse Ziehkeil v určitém rozsahu parametrů (intenzita, čas) a zhodnotit optimálnost parametrů, případně stanovit optimální parametry pro indukční proces.

Nejsledovanější ukazatel po indukčním popouštění je povrchová tvrdost na konci dílu, viz výkres dílu – obrázek 4. 3, strana 38.

Dalším cílem je udělat rozbor současného pracovního cyklu indukčního popouštění. Zjistit, jaký je průběh tvrdosti směrem od konce (špičky) dílu, jak u dílu s proticementační pastou, tak bez pasty.

Závěrem bych provedl úvahu ohledně dílů bez proticementační pasty.

4. Experimentální část

4.1. Výrobek Achse Ziehkeil

Díl Achse Ziehkeil je vyráběn pro automobilový průmysl, je součástí sestavy (obrázek 4. 2), která má funkci ve dvojspojkové převodovce DQ 500 zajistit automobil proti pohybu při zastavení vozidla.

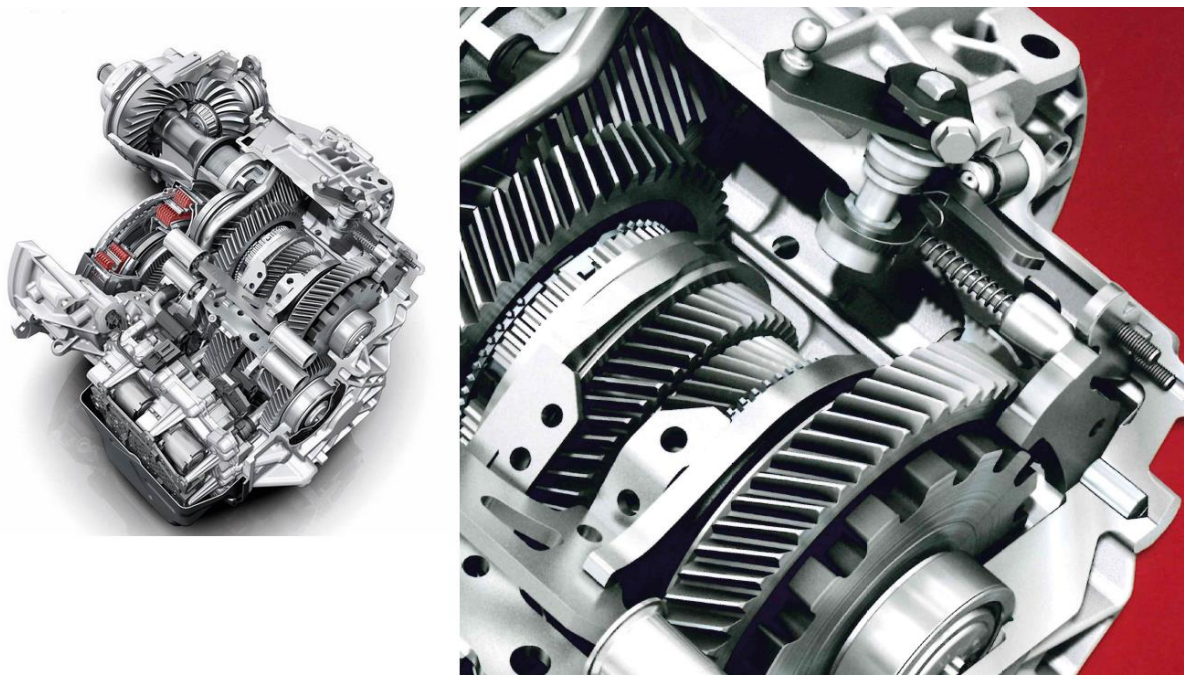
Na obrázku 4. 1 a 4. 2 je zdokumentovaná součást Achse Ziehkeil a na obrázku 4. 3 je zobrazeno použití a umístění dílu Achse Ziehkeil ve dvojspojkové převodovce DQ 500.



Obrázek 4. 1 Díl Achse Ziehkeil



Obrázek 4. 2 Sestava dílu Achse Ziehkeil

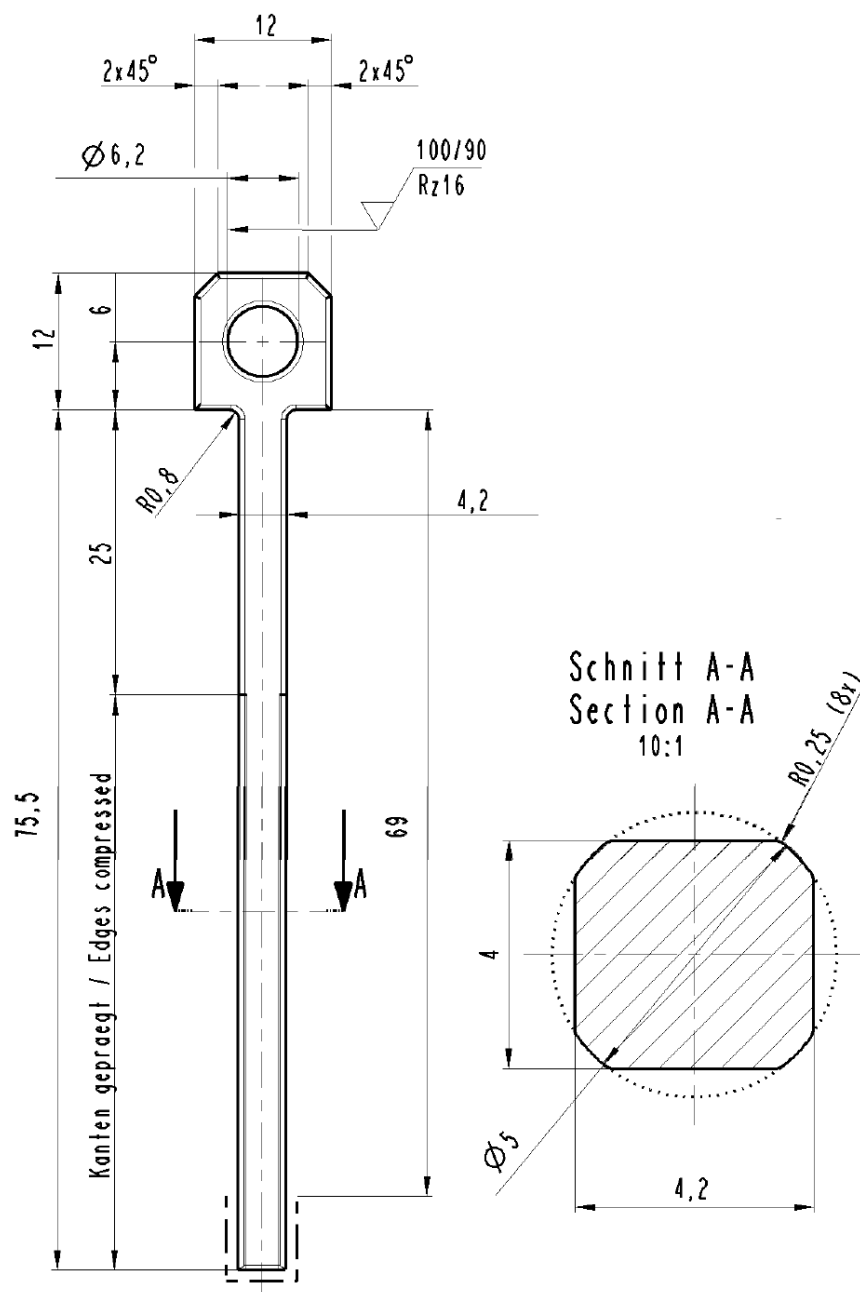


Obrázek 4. 3 Achse Ziehkeil v dvojspojkové převodovce DQ 500

4. 1. 1. Požadavky

Na obrázku 4. 4 je zobrazen výkres dílu Achse Ziehkeil. Celý díl prochází cementováním a kalením až na oblast vyznačenou čerchovanou čarou, která je chráněna proticementační (ochrannou) pastou za účelem dosažení požadované tvrdosti.

Minimální tvrdost po kalení je 680 HV5 pro celý díl kromě oblasti vyznačené čerchovanou čarou. Pro čerchovaně vyznačenou oblast platí požadavek na tvrdost v rozmezí 24 ± 4 HRC po indukčním popouštění.



Obrázek 4. 4 Výkres Achse Ziehkeil

4. 1. 2. Materiál

Díl Achse Ziehkeil je vyráběn z oceli 16MnCr5+A (číselné značení podle EN 1.7131, podle ČSN 14 220). Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou mangan-chromovou ocel určenou k cementování a následnému zušlechtění. Ocel se dodává ve stavu žíhaném naměkko (označení +A). Chemické složení oceli dané normou EN 10084-2008 je uvedeno na obrázku 4. 5. [15]

Prvek	% hm.
C	0,14 - 0,19
Si	max. 0,40
Mn	1,00 – 1,30
P	max. 0,035
S	max. 0,035
Cr	0,80 – 1,10

Obrázek 4. 5 Složení oceli 16MnCr5 [12]

Ocel 16MnCr5 patří mezi nejčastěji používané oceli pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Ocel se prokaluje do hloubky 30 mm. Má dobrou svařitelnost a po vhodném tepelném zpracování je rovněž dobře tváritelná za studena. Přidáním bóru v malém množství (0,0008 až 0,0050 %) se dosahuje zvýšené houževnatosti cementované vrstvy. [15]

Doporučené teploty pro tepelné zpracování a tváření za tepla jsou [15]

	Teplota [°C]
Tváření za tepla	900 až 1 100
Žíhání naměkko	650 až 700
Cementování	880 až 980
Kalení na jádro	860 až 900
Kalení na povrch	780 až 820
Popouštění	150 až 200

Prostředí pro ochlazování při kalení je nejčastěji olej nebo voda. Doporučená minimální doba popouštění je jedna hodina.

Základní mechanické vlastnosti oceli po kalení v jádře a popouštění při 150 až 200 °C jsou ([15])

Průměr v mm	R_e min. [MPa]	R_m [MPa]	A min [%]
$d \leq 11$	735	1 030 - 1 375	8
$11 < d \leq 25$	540	785 - 1 080	9
$25 < d \leq 40$	490	685 - 930	10

Hustota oceli je udávána hodnotou $7\,850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

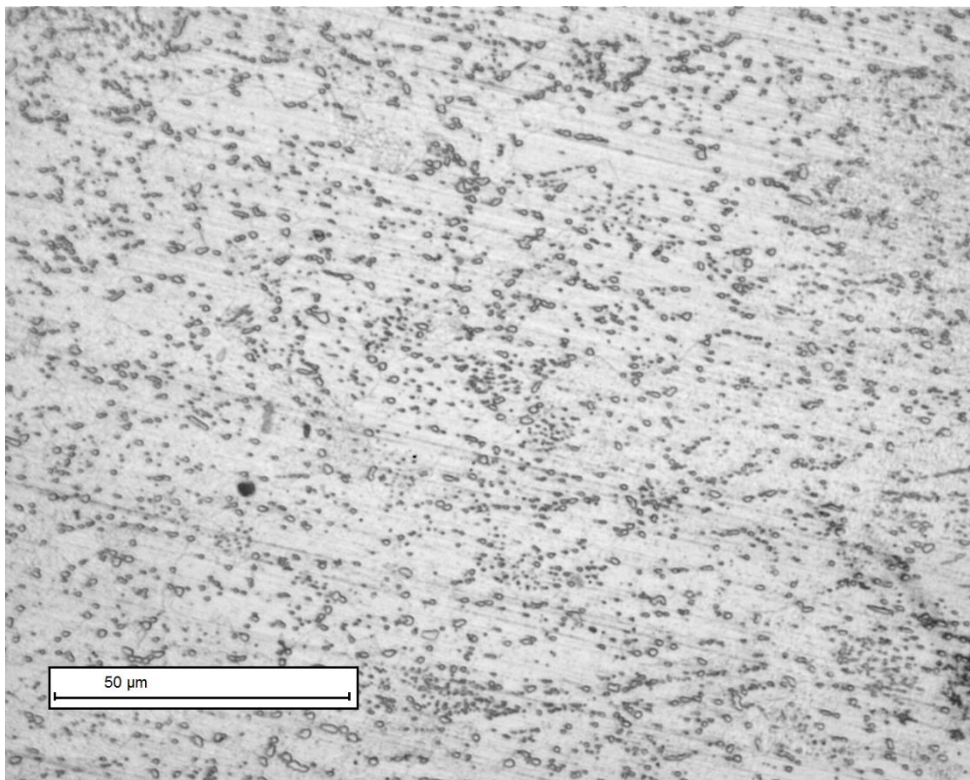
Další a podrobnější vlastnosti oceli 16MnCr5 jsou uvedeny v materiálovém listu, viz příloha 1.

Dodaný stav materiálu

Zde je uvedený technologický postup zpracování materiálu, než dorazí do společnosti KERN-LIEBERS CR spol. s r.o.:

- dodání surového materiálu
- ohřev
- válcování surového materiálu na tabule
- stříhání
- ohřev v průběžné mezi-peci
- válcování na hlavní trati
- válcování na dokončovací trati
- praní
- žíhání naměkko
- řezání na délku
- balení a expedice

Na obrázku 4. 6 je struktura oceli v dodacím stavu.



Obrázek 4. 6 Struktura oceli 16MnCr5

4. 1. 3. Technologický postup

Zde je shrnutý technologický postup výroby Achse Ziehkeil.

Přesné lisování probíhá na mechanicko-hydraulickém lisu. V jednom cyklu jsou vyhotoveny dva výlisky. Výlisky padají do kovových přepravek.

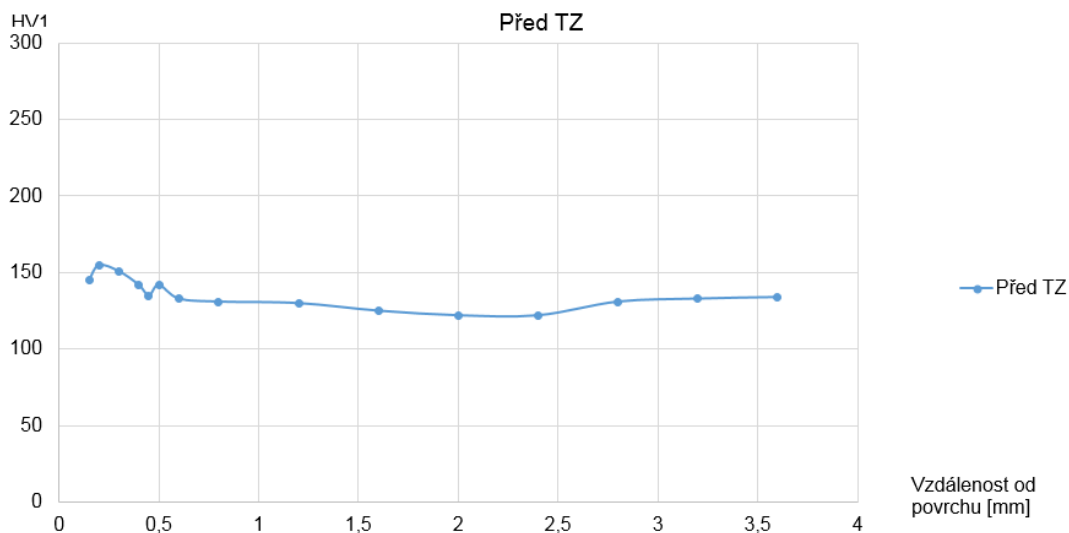
Pásově broušení, kterým se odstraní ostré hrany po lisování. (vzniklé ostřiny po lisování)

Praní se provádí z důvodu očištění dílů po lisování a broušení. Díly se perou v uhlovodíkové pračce.

Ruční lisování, které probíhá na základacím hydraulickém lisu. Provádí se sražení hran, podle výkresu v délce 50,5 mm od špičky dílu, viz obrázek 4. 4.

Praní probíhá ještě jednou. Je důležité, aby byly díly před tepelným zpracováním zbaveny nečistot a ocelového odpadu.

Na obrázku 4. 7 je zobrazen průběh tvrdosti HV1 na špičce dílu, na které je požadavek na tvrdost. Z průběhu je vidět, že tvrdost je stejná jako v jádře. Před tepelným zpracováním by měla být tvrdost stejná v celém dílu.



Obrázek 4. 7 Průběh tvrdosti HV 1 před tepelným zpracováním na špičce dílu

Namáčení do proticementačního přípravku se provádí z důvodu ochrany špičky proti nauhličení – viz obrázek 4. 8. Špička je chráněna proticementační

pastou. Toto opatření se provádí proto, aby nevznikla nacementovaná vrstva ve špičce součásti, a tudíž si v té lokaci díl zachoval nízkou tvrdost z důvodu nýtování špičky dílu. Podle výkresu se jedná o oblast od konce dílu do vzdálenosti 6,5 mm.

Proticementační pasta shoří během tepelného zpracování a případné zbytky jsou odstraňovány při praní po tepelném zpracování.



Obrázek 4. 8 Součást namočená do proticementačního přípravku

Cementování probíhá ve víceúčelové komorové peci při teplotě 880 °C, celý proces probíhá v atmosféře obsahující dusík. Do pece je vpravován kapalný metanol, který je zdrojem uhlíku. Po ohřevu na cementační teplotu následuje výdrž na teplotě 1 až 2 hodiny.

Kalení probíhá ve stejné peci při teplotě 850 °C. Výdrž na kalicí teplotě je kratší, řádově do 30 minut. Následně jsou díly zakaleny v oleji o teplotě 80 °C.

Během procesu cementování a kalení jsou sledovanými parametry: teplota, cementační účinek, procentní podíl dusíku v atmosféře a čas – doba výdrže na jednotlivých teplotách.

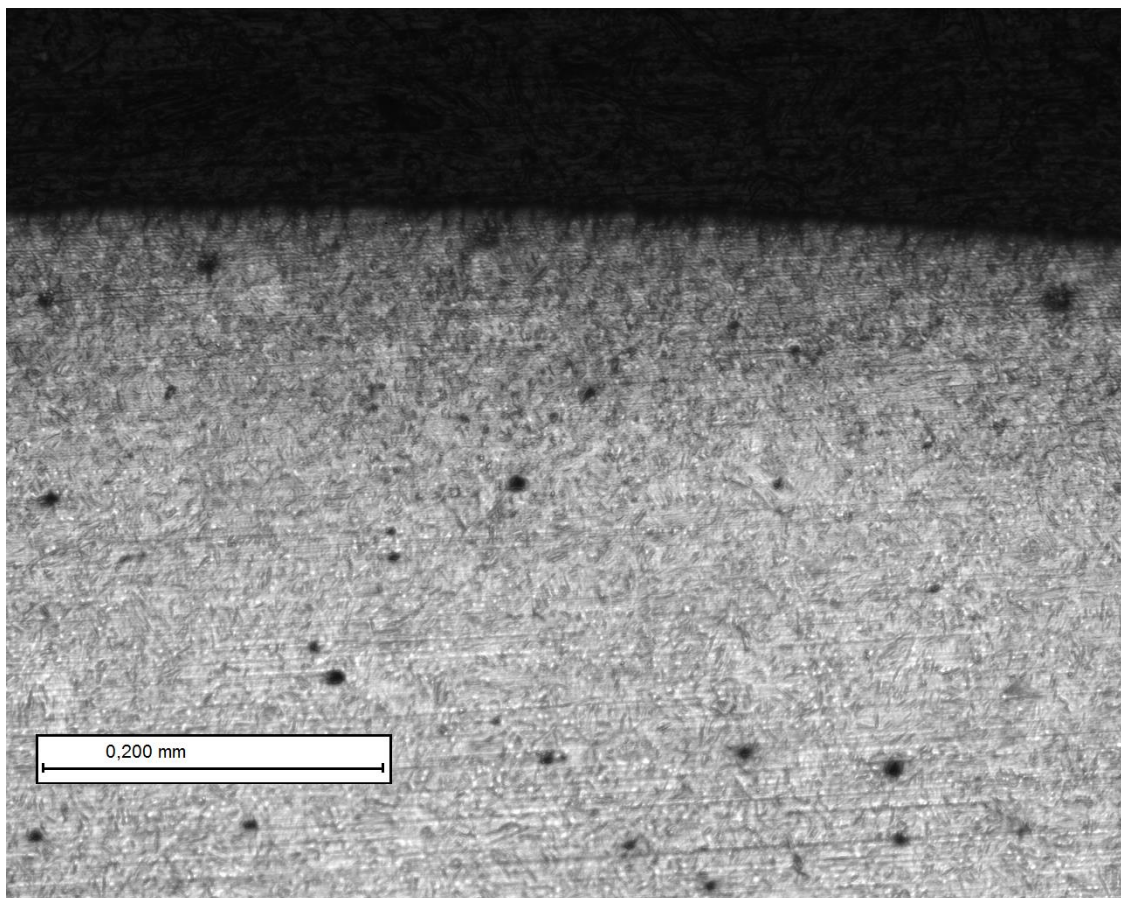
Praní je další operací po kalení a probíhá ve vodě. Účelem je očistit díl od oleje po kalení a ochránit popouštěcí pec před kontaminací.

Popouštění probíhá při teplotách 160 °C. Minimální doporučená výdrž je 1 hodina.

Po tepelném zpracování probíhá **kontrola**. Kontroluje se povrchová tvrdost, která musí být minimálně 680 HV5. Dále se jeden kus rozřízne a vytvoří se metalurgický vzorek pro kontrolu cementované vrstvy. Řez se provádí minimálně 30 mm od špičky, která není nacementovaná.

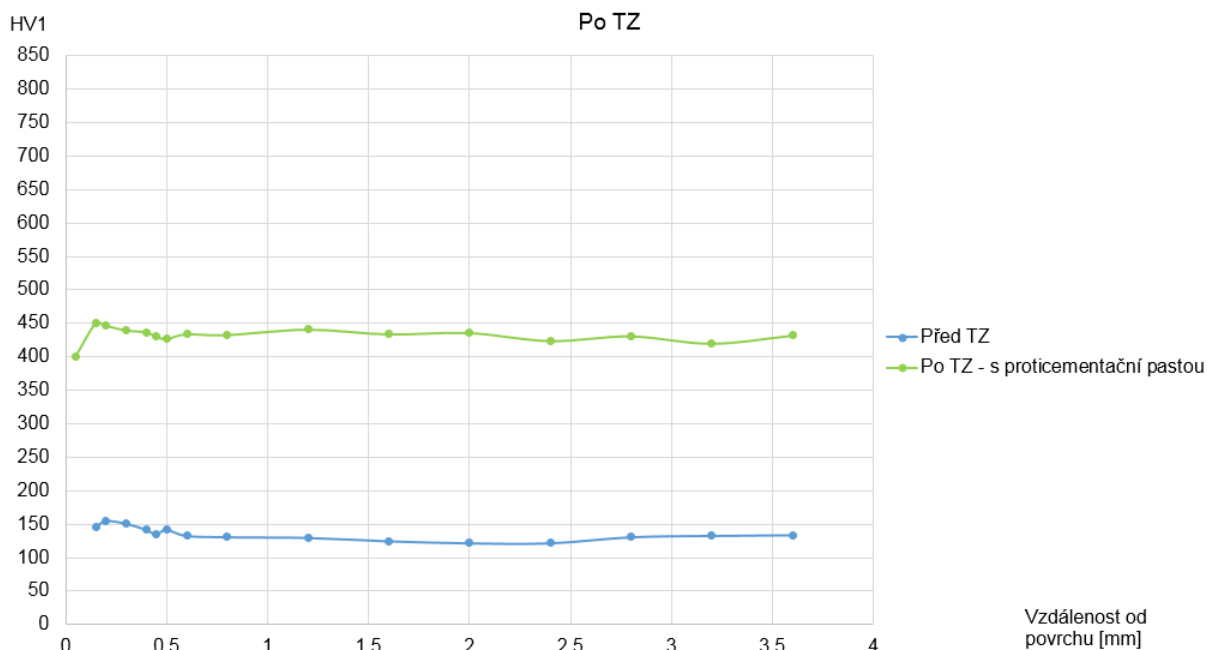
Tloušťka cementované vrstvy musí být v rozmezí 0,2 až 0,4.

Na obrázku 4.9 je dokumentována struktura dílu Achse Ziehkeil ve vzdálenosti 4 mm od konce – tedy v oblasti, která byla chráněna proticementační pastou. V této oblasti by měla ocel 16MnCr5 mít obsah uhlíku v rozmezí 0,14 – 0,19 %. Povrchová struktura je tvořena nízkouhlíkovým martezitem.



Obrázek 4. 9 Struktura oceli 16MnCr5 po tepelném zpracování

Na obrázku 4.10 (strana 44) je zobrazen průběh tvrdosti HV1 na špičce dílu po tepelném zpracování a porovnání s tvrdostí před tepelným zpracováním. Tvrdost je na povrchu špičky dílu stejná jako v jádře celého dílu. Toto vypovídá o účinném vlivu proticementační pasty.



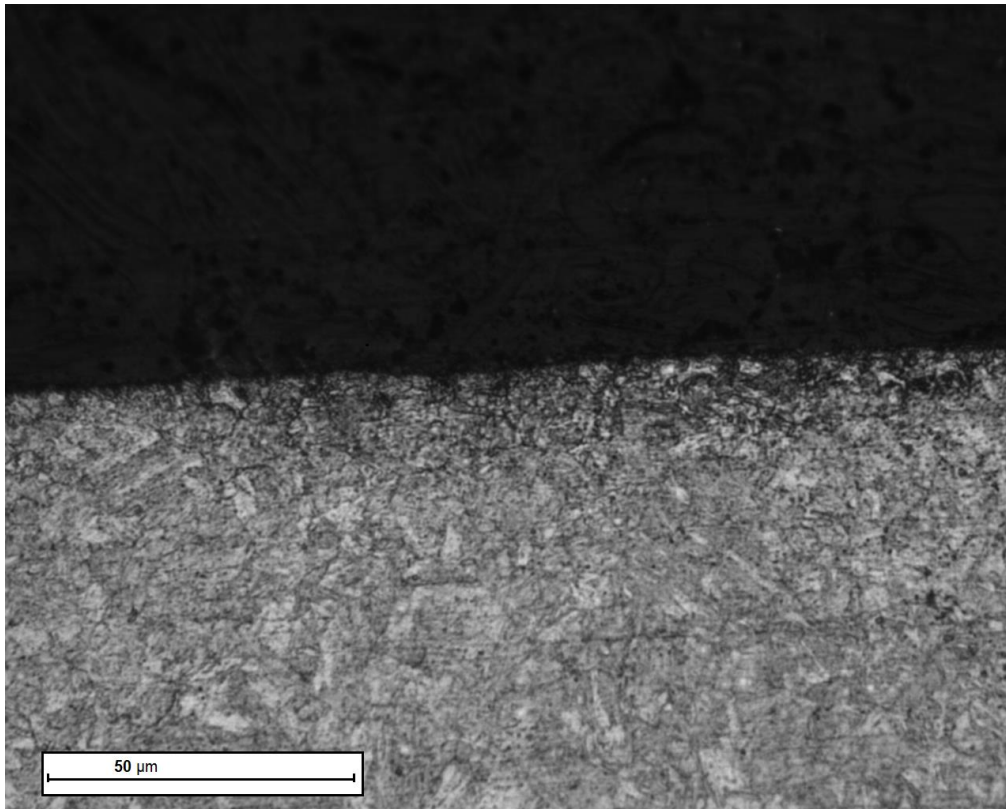
Obrázek 4. 10 Průběh tvrdosti HV1 po tepelném zpracování na špičce dílu

Indukční popouštění bude podrobněji rozebráno v dalším textu. Popouštění se provádí za účelem snížení tvrdosti špičky na hodnoty 20 až 28 HRC z důvodu snadného pozdějšího nýtování za studena a zabránění vzniku trhlin.

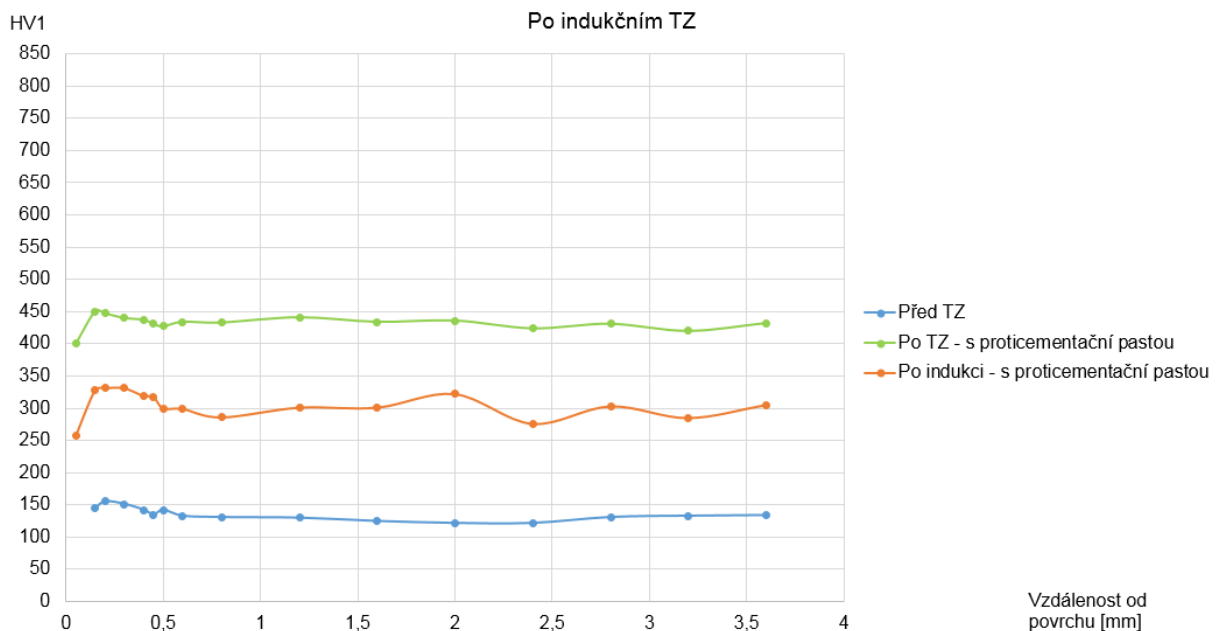
Následně se provádí **kontrola** povrchové tvrdosti v oblasti špičky dílu. Tvrdost se měří přibližně 4 mm od konce dílu, kde musí být v rozmezí 20 až 28 HRC.

Na obrázku 4.11 je dokumentována povrchová struktura na špičce dílu po indukčním popouštění. Struktura je tvořena vysokopopuštěným nízkouhlíkovým martenzitem.

Tvrdost a její průběh po indukčním popouštění je na obrázku 4.12. Průběh tvrdosti dokazuje, že indukčním popouštěním dosáhneme žádaného téměř konstantního snížení tvrdosti po délce vzorku včetně jádra na špičce dílu.



Obrázek 4. 11 Struktura na špičce dílu po indukčním popouštění



Obrázek 4. 12 Průběh tvrdosti HV1 na špičce dílu po indukčním popouštění

Omílání následuje po tepelném zpracování. Omílání probíhá v zařízení s omílacími kameny. Omíláním se odstraní zbytky oxidačních produktů na povrchu dílu po tepelném zpracování. Po omílání získává díl jednotnou barvu, odstraní se

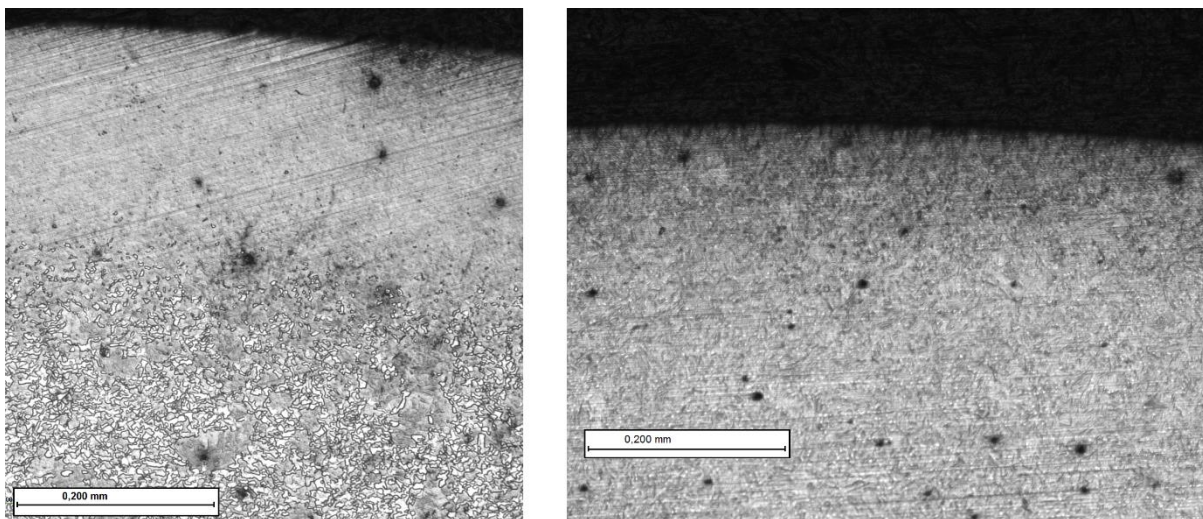
barevné zabarvení po indukčním popouštění – viz obrázek 4. 13. Také se odstraní zbytky ostrých hran po sražení hran.



Obrázek 4. 13 Vzhled dílu po indukčním tepelném zpracování

Poslední operací před konečnou kontrolou rovinnosti je ponoření do **lázně** antikorozního prostředku.

Nakonec se kontroluje **rovinnost** dílu propadovou zkouškou.



Obrázek 4. 14 Povrchová struktura dílu bez pasty a s pastou

Na obrázku 4.14 je porovnání struktury součásti bez proticementační pasty (vlevo) a s proticementační pastou (vpravo).

U dílu bez proticementační pasty je v povrchové vrstvě patrná nauhličená vrstva, která je tvořena převážně martenzitickou strukturou. V jádře struktura perlitická.

Povrchová struktura dílu s proticementační pastou je tvořena nízkouhlíkovým martenzitem. Struktura jádra pak feritem a perlitem.

4. 1. 4. Díl bez proticementačního přípravku

Dalším cílem diplomové práce je nalézt optimální parametry indukčního popouštění dílu bez proticementačního přípravku a zjistit, jestli je možné dosáhnout požadované povrchové tvrdosti.

Z technologického postupu dílu bude vynecháno namáčení do proticementačního přípravku.

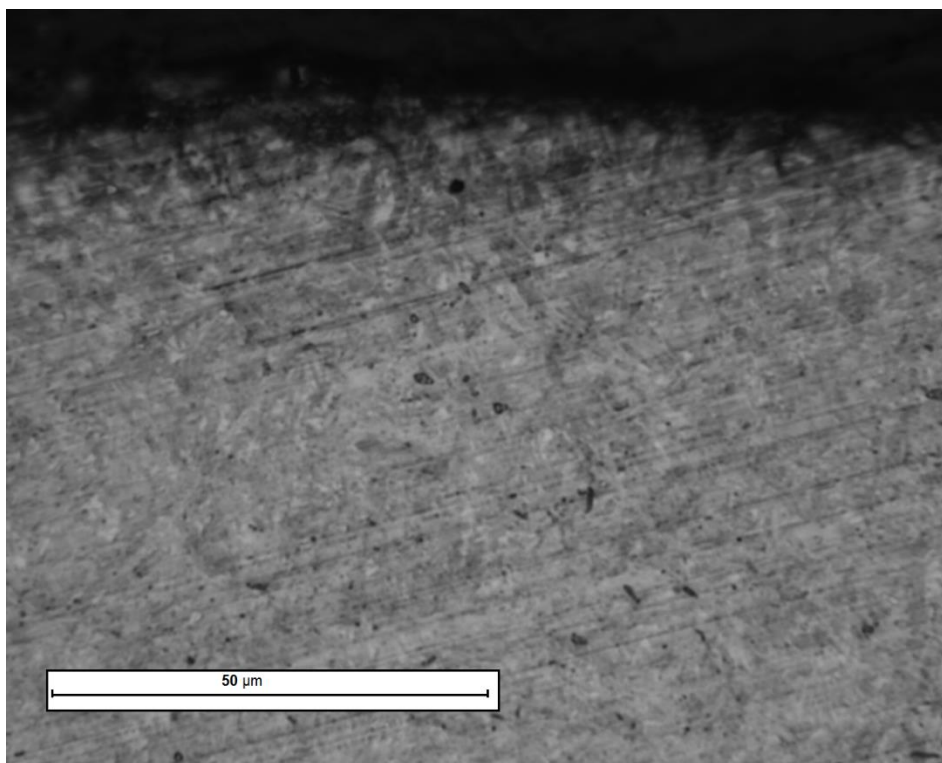
Tento díl se sériově zatím nevyrábí. Ovšem jeho výroba by byla finančně méně náročnější o náklady na proticementační přípravek.

Technologický postup pro díl bez proticementačního přípravku

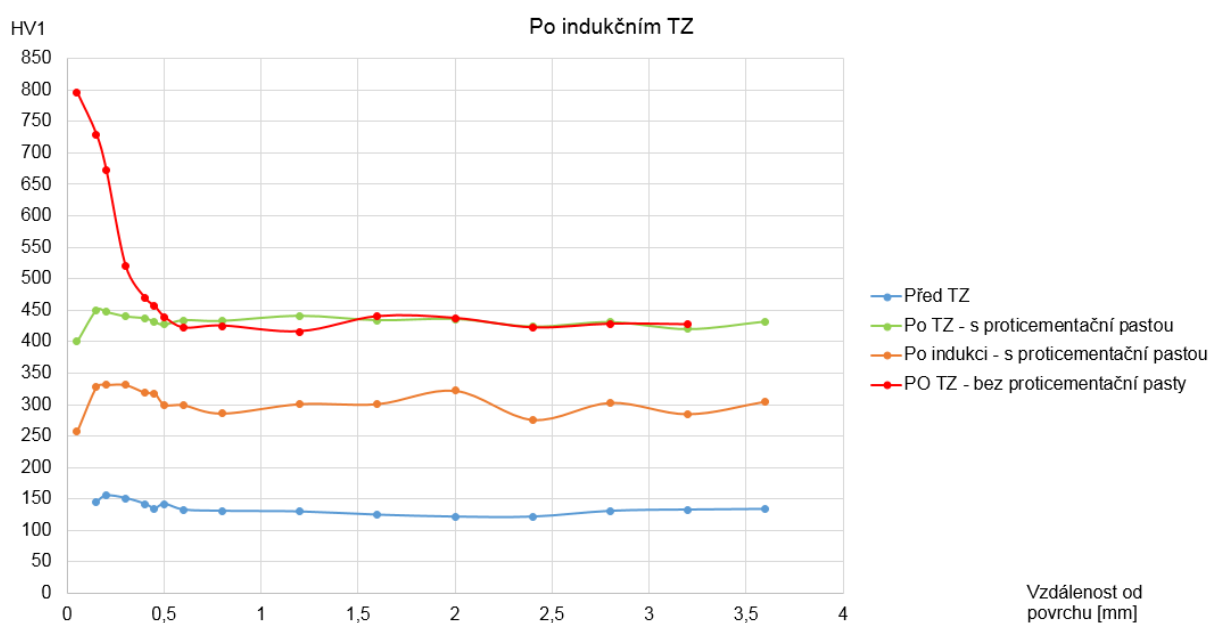
- Přesné lisování
- Pásové broušení
- Praní
- Ruční lisování
- Praní
- ~~Namáčení do proticementačního přípravku~~
- Cementování
- Kalení
- Praní
- Popouštění
- Kontrola – zkouška tvrdosti
- Indukční popouštění
- Kontrola – zkouška tvrdosti
- Omílání
- Lázeň – ponoření do antikoroziního prostředku
- Kontrola rovinnosti

Na obrázku 4.15 je zobrazena povrchová struktura dílu bez proticementační pasty. Struktura je tvořena nízkopopuštěným vysokouhlíkovým martenzitem.

Následně na obrázku 4.16 dokazuje průběh tvrdosti HV1, že na povrchu je přítomna nauhličená vrstva.



Obrázek 4. 15 Povrchová struktura na špičce dílu bez použití proticementační pasty



Obrázek 4. 16 Průběh tvrdosti HV1 u dílu bez použití proticementační pasty po tepelném zpracování

4. 2. Indukční zařízení

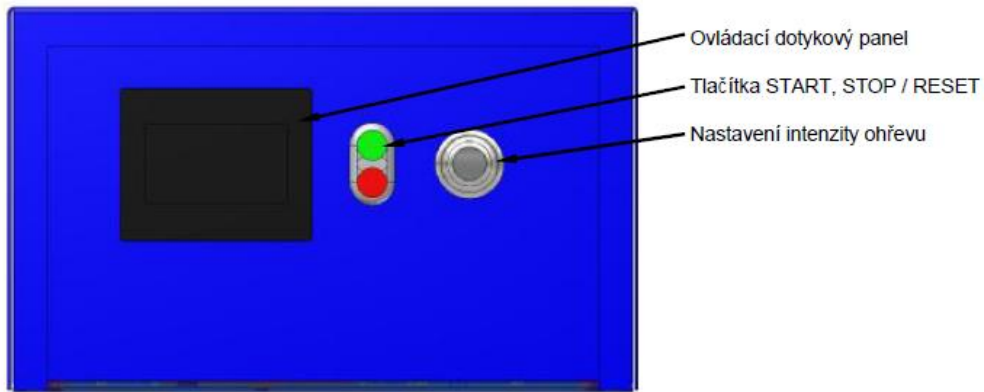
Současné indukční zařízení používané pro indukční popouštění je od společnosti RAJMONT, s.r.o. (viz obrázek 4. 17). Jedná se o vysokofrekvenční indukční zařízení HFR15 s výkonem 15 kW a rozsahem kmitočtu 50 až 500 kHz. [12]



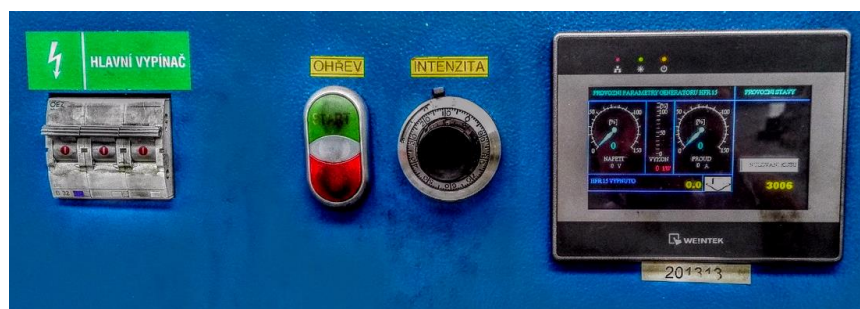
Obrázek 4. 17 Indukční zařízení od společnosti RAJMONT, s.r.o.

Regulace procesu indukčního žhání probíhá volbou dvou parametrů – intenzity a času pracovního cyklu. Volba intenzity probíhá v jednotce $[V \cdot m^{-1}]$ z hlavního výkonu. Intenzita se nastavuje vedle dotykového ovládacího panelu (viz obrázek 4. 18). Na ovládacím dotykovém panelu se nastavuje doba pracovního cyklu v sekundách. Ovládací panel a nastavování intenzity je vidět i na obrázku 4. 17, 4. 18 a 4. 19.

Na ovládacím panelu se zobrazí informativně pracovní proud a napětí, ale není možné ani jedno navolit nebo jakkoli měnit.



Obrázek 4. 18 Ovládání zařízení HFR15



Obrázek 4. 19 Ovládání zařízení HFR 15

Na obrázku 4. 20 je vidět zakládání výrobku do induktoru. Ohřívaná součást je upnuta magneticky. Po proběhnutí cyklu je výrobek vyhozen automatickým vyhazovačem do přípravku pod induktorem. Přibližně 8 mm dílu od konce špičky je vloženo do induktoru.



Obrázek 4. 20 Umístění výrobku Achse Ziehkeil v induktoru

4.3. Stanovení optimálních parametrů

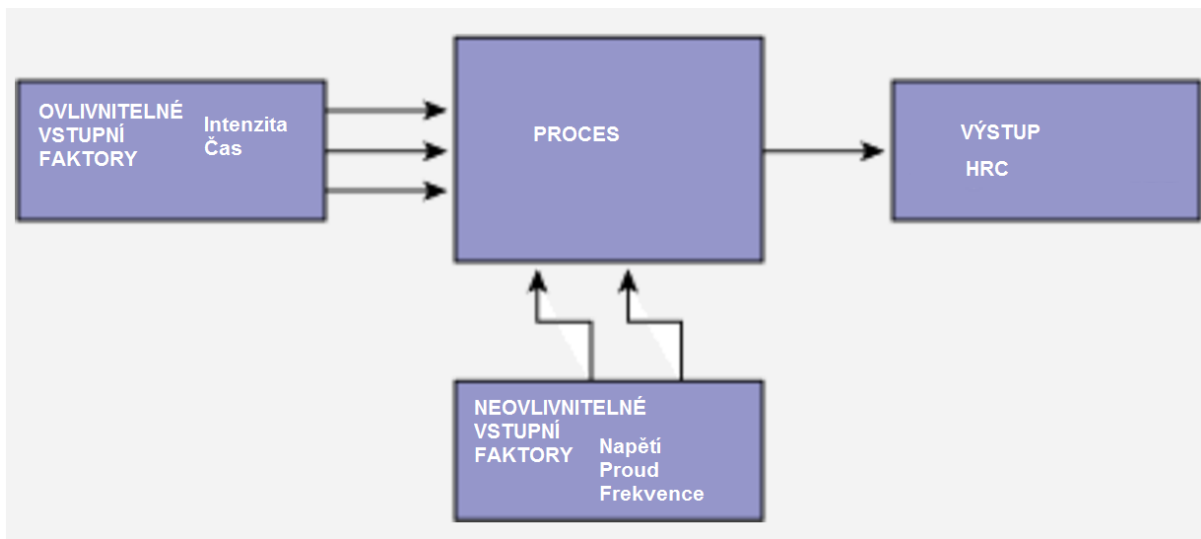
4.3.1. Metoda DOE

Základní princip metody DOE (design of experiments) položil ve 30. letech 20. století anglický matematik Sir Ronald Fisher, který měl za úkol zpracovat výsledky šedesáti let experimentální práce v Rothamsteadské královské zemědělské výzkumné stanici. [16]

Na pracovní proces a na výstup má vliv řada faktorů, ale jen některé z nich dokážeme řídit nebo kontrolovat (viz obrázek 4. 21). Výstup je nějaká odezva nebo měřitelná veličina. Metoda DOE spočívá v nalezení takové kombinace říditelných faktorů, aby výstupní odezva byla co nejpříznivější. [16]

Metoda DOE se používá při navrhování procesů a výrobků, na které má vliv řada faktorů. Hlavními oblastmi použití jsou chemický, farmaceutický či zpracovatelský průmysl, ale také strojní inženýrství a oblast marketingu a rozvoje služeb. [16]

V rámci diplomové práce, u procesu indukčního popouštění, jsou ovlivnitelnými faktory intenzita a čas, které jako jediné lze na indukčním zařízení měnit. Neovlivnitelnými parametry jsou proud, napětí a frekvence, které na proces vliv mají, ale nelze je měnit.



Obrázek 4. 21 Metoda DOE [17]

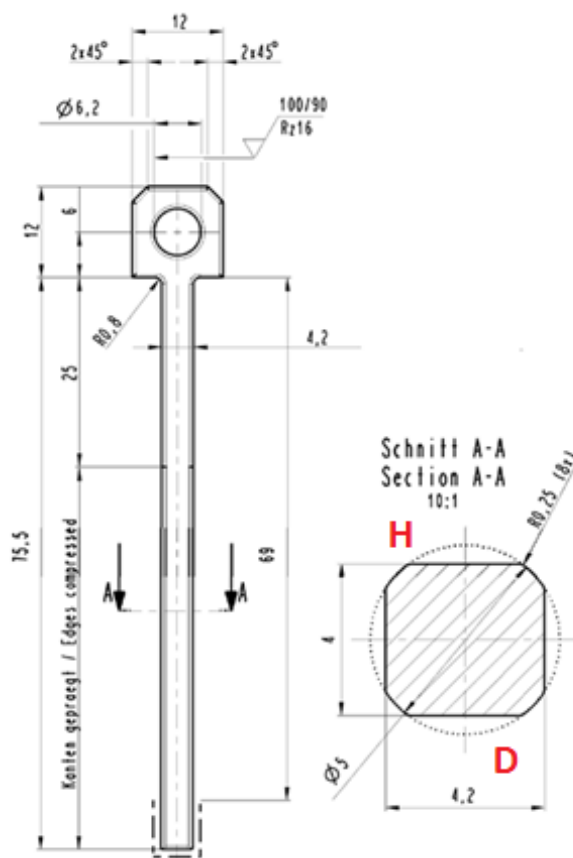
4.3.2. Stanovení optimálních parametrů

Po konzultaci s technologií z kalírny bylo zvoleno 6 různých hodnot času pracovního cyklu a 4 hodnoty intenzity. Pro každou kombinaci jsem použil 3 vzorky. Celkem bylo použito 72 vzorků.

Zvolené parametry		Čas [s]					
		3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Intenzita [V.m ⁻¹]	1,0						
	1,2						
	1,3						
	1,4						

Tabulka 4. 1 Rozsah parametrů

Všechny naměřené hodnoty jsou uvedeny v přílohách. Nejdůležitějším ukazatelem správného průběhu cyklu je tvrdost v oblasti vyznačené čárkovanou čarou (obrázek 4. 21), která je stanovena rozmezím 24 ± 4 HRC. Měření tvrdosti bylo prováděno z obou stran (horní a dolní) – vyznačeno písmeny H a D na obrázku 4. 20.



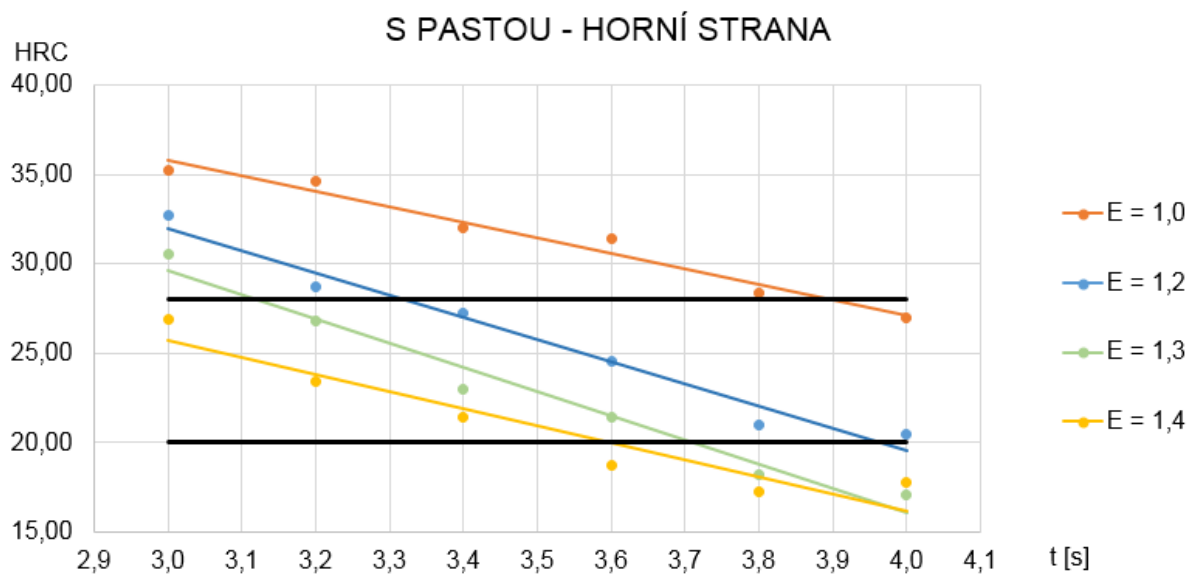
Obrázek 4. 22 Výkres dílu Achse Ziehkeil s vyznačenými stranami

4.3.3. Výsledné hodnoty

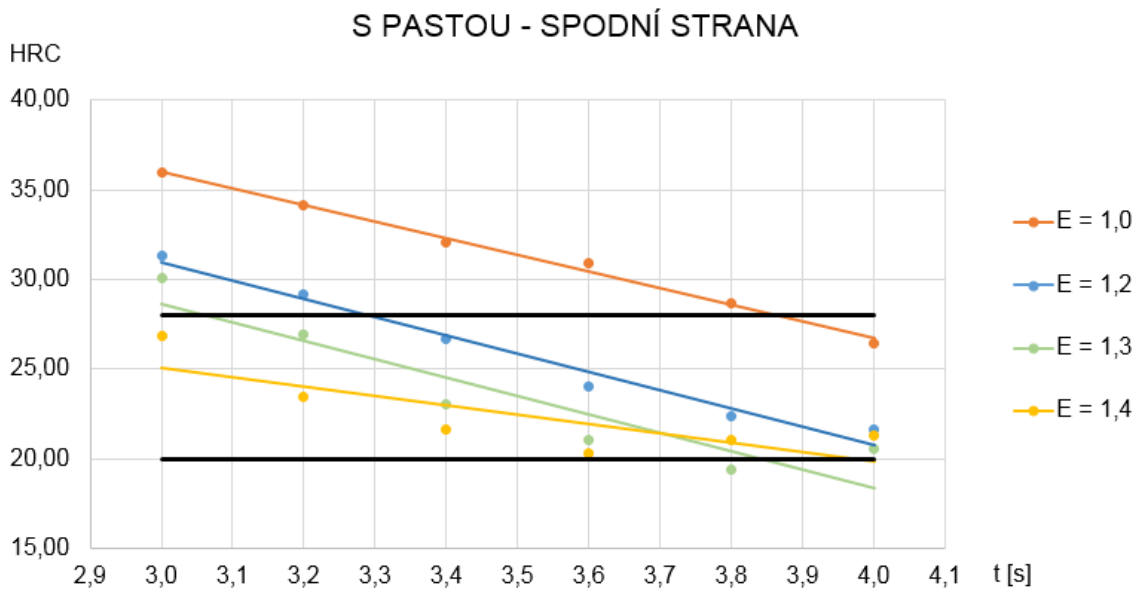
Achse Ziehkeil – díl s proticementační pastou

Prvním krokem bylo nalezení optimálních parametrů popouštění u dílu s proticementační pastou. Parametry byly zvoleny podle bodu 4.3.2. na straně 52. Na každém vzorku byla měřena tvrdost na horní a spodní straně.

Na následujících obrázcích jsou graficky znázorněny naměřené hodnoty. Celá tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 2. Povrchová tvrdost byla měřena metodou HRC. [18]



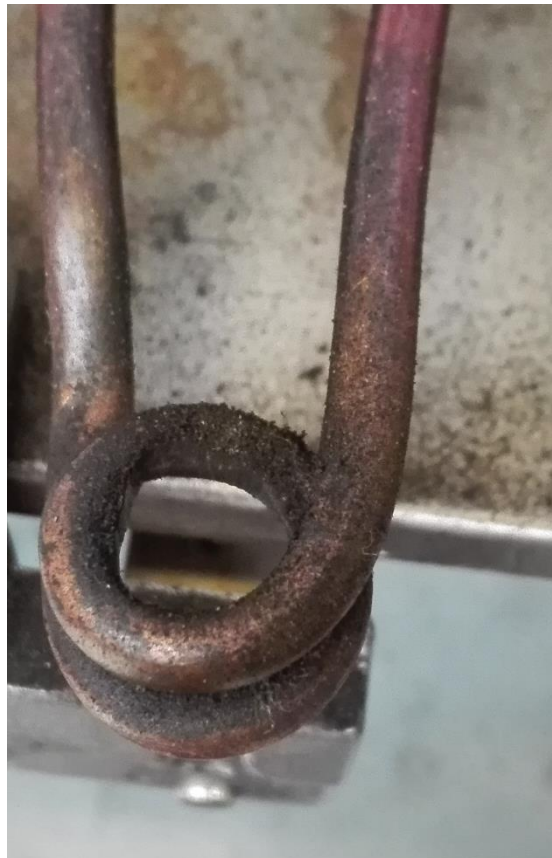
Obrázek 4. 23 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro horní stranu



Obrázek 4. 24 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro spodní stranu

Černé vodorovné linky na obrázcích 4. 22 a 4. 23 označují toleranční pole tvrdosti HRC. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 2.

Z naměřených hodnot vyplývá, že se liší tvrdosti na horní a dolní straně. Jev je patrně způsoben nesymetrickou konstrukcí induktoru (obrázek 4. 25).



Obrázek 4. 25 Konstrukce používaného induktoru

Z konstrukce induktoru je vidět, že na jedné straně jsou dva průřezy a na druhé straně pouze jeden. Z naměřených hodnot bylo zjištěno, že ze strany se dvěma průřezy induktoru dochází dle předpokladu k většímu ohřevu a tvrdost je zde nižší. Proto bylo nutno hledat vhodné parametry tak, aby obě strany dílu po indukčním popouštění vyhovovaly předpisu tvrdosti.

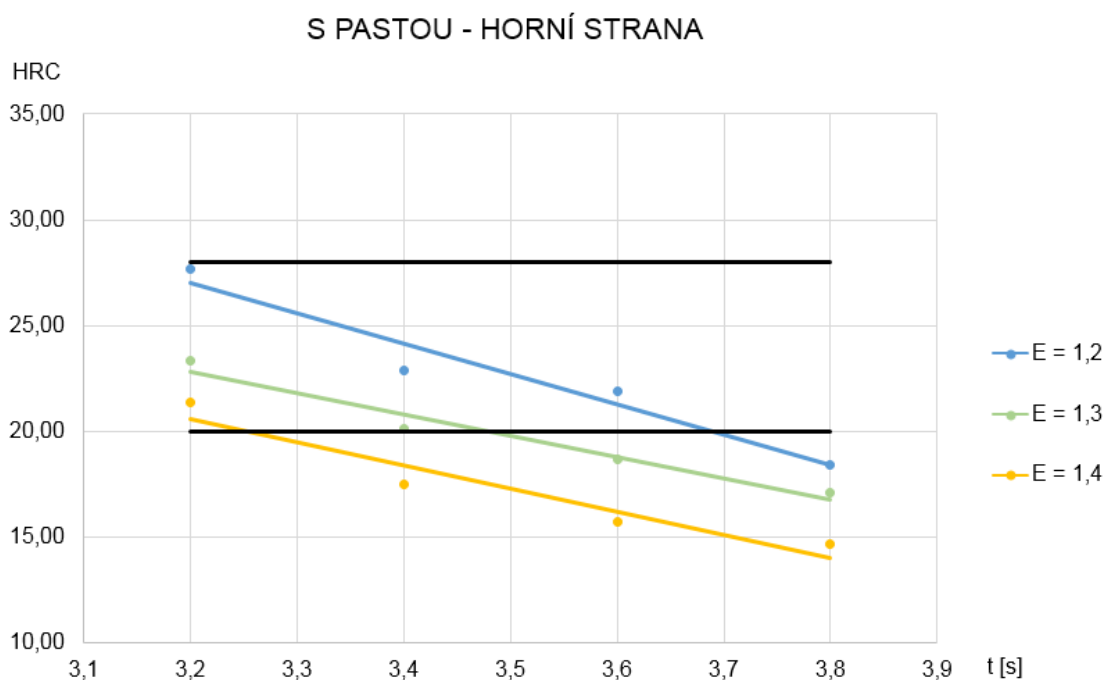
U dílů s proticementační pastou bylo kontrolní zpracování a měření provedeno znovu s tím, že byly vynechány parametry, které zjevně nevyhovovaly.

Zvolené parametry		Čas [s]					
		3,0	3,2	3,4	3,6	3,8	4,0
Intenzita [V.m ⁻¹]	1,0						
	1,2						
	1,3						
	1,4						

Tabulka 4. 2 Rozsah parametrů

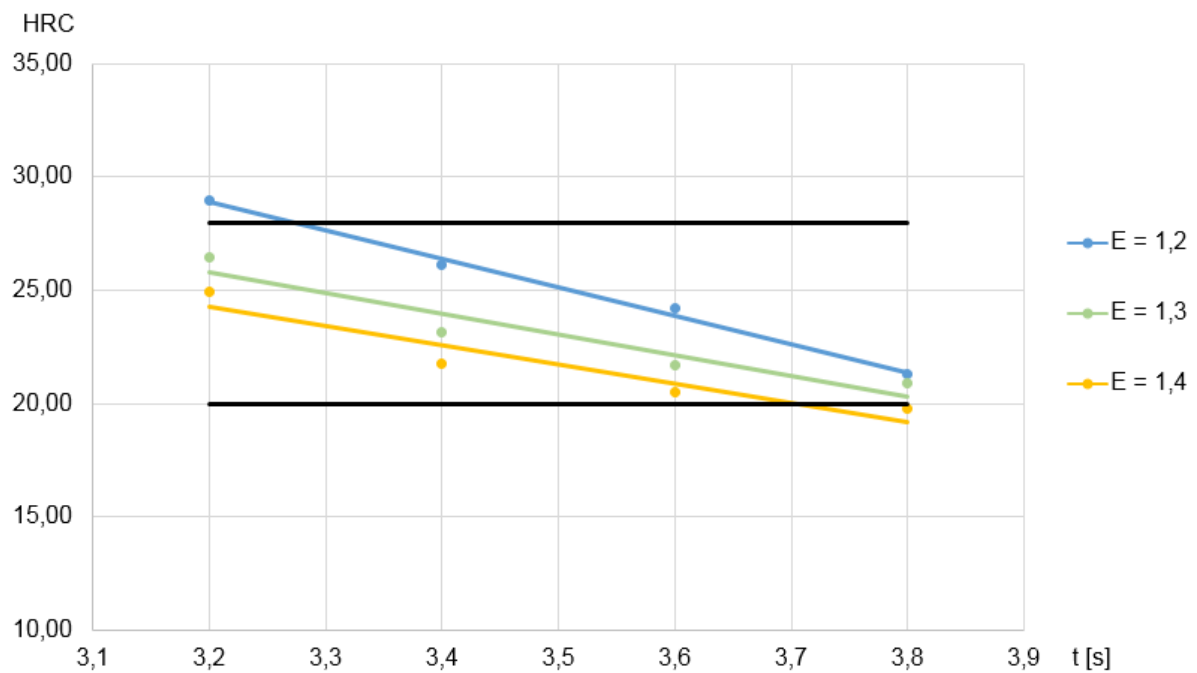
V tabulce 4. 2 jsou tučně zvýrazněny parametry, které byly použity pro druhý krok hledání optimálních parametrů. Pro každou kombinaci parametrů bylo analyzováno 7 dílů oproti prvnímu kroku, kde byly díly 3.

Naměřené hodnoty uvedeny v grafické podobě na následujících obrázcích (4. 26, 4. 27). Kompletní tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 3.



Obrázek 4. 26 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro dolní stranu

S PASTOU - SPODNÍ STRANA



Obrázek 4. 27 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro spodní stranu

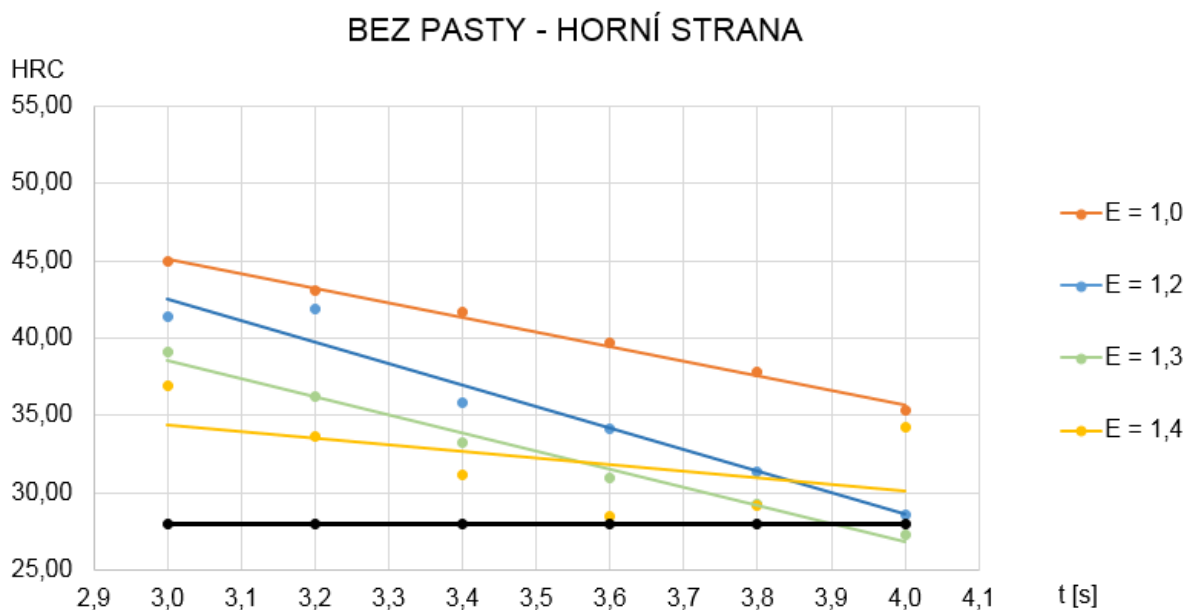
Na základě těchto naměřených hodnot byly jako optimální zvoleny následující parametry:

Intenzita: 1,2 [$V \cdot m^{-1}$]

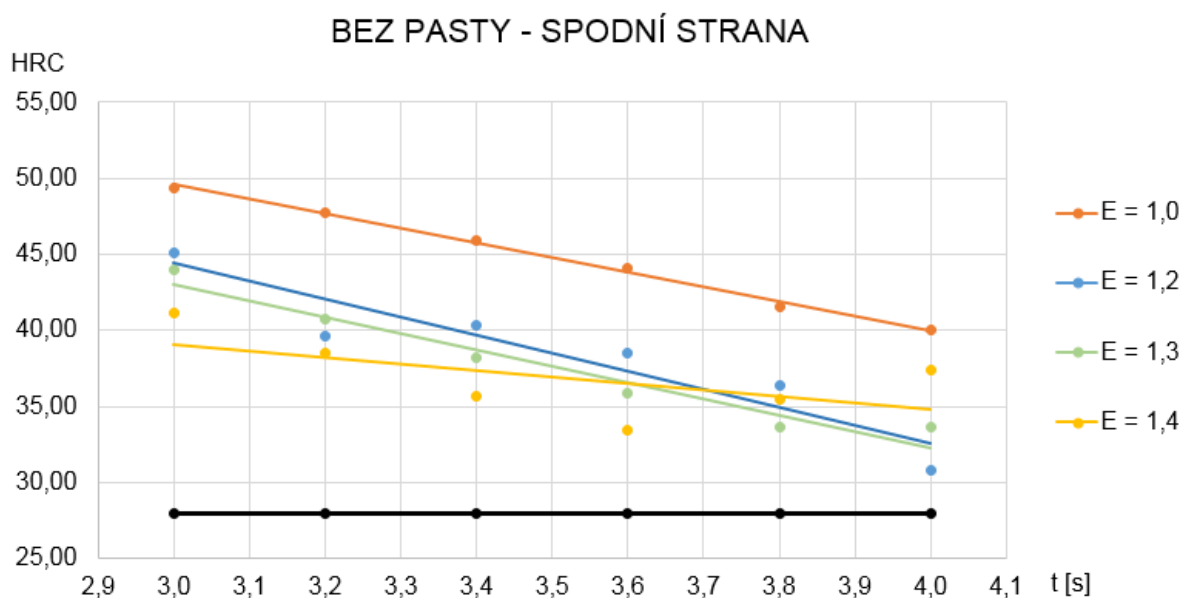
Čas: 3,4 [s]

Achse Ziehkeil – díl bez proticementační pasty

U dílů bez proticementační pasty byly použity parametry stejné jako u dílů s proticementační pastou. Tabulka naměřených hodnot je uvedena v příloze 4. Na následujících obrázcích (4. 28, 4. 29) jsou graficky znázorněny naměřené hodnoty.



Obrázek 4. 28 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro horní stranu



Obrázek 4. 29 Závislost tvrdosti HRC na délce pracovního cyklu pro spodní stranu

Na obrázcích 4. 28 a 4. 29 je u křivky pro intenzitu $E = 1,4 \text{ [V}\cdot\text{m}^{-1}]$ a čas $t = 4,0 \text{ [s]}$ vidět, že tvrdost stoupá. To by mohlo být způsobeno příliš intenzivním ohřevem a následným zakalením špičky dílu.

Na základě těchto naměřených hodnot byly po konzultaci s technologií z kalírní společnosti KERN-LIEBERS spol. s r.o. jako neoptimalnější zvoleny parametry:

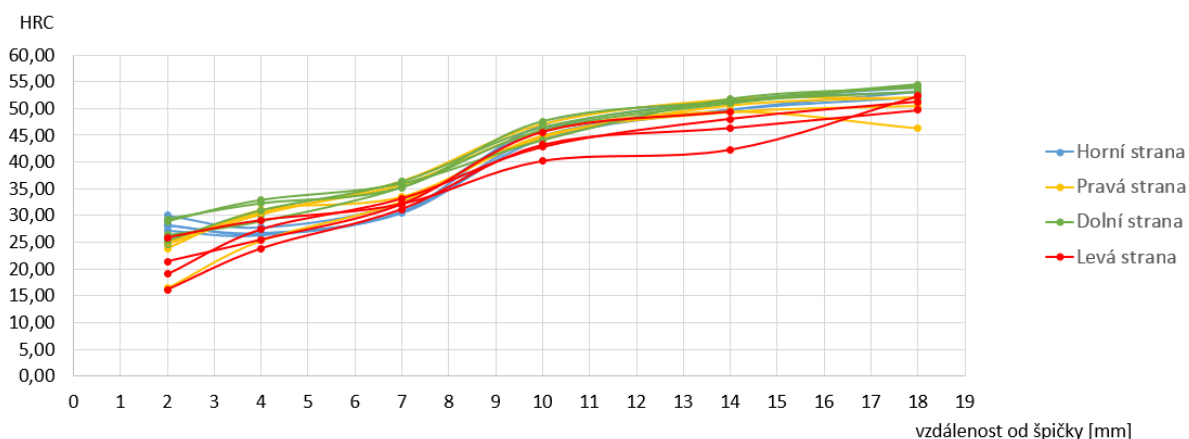
Intenzita: 1,3 $[\text{V}\cdot\text{m}^{-1}]$
Čas: 4,0 [s]

Přesto u dílů bez proticementační pasty se na současném zařízení nedaří získat tvrdost dostatečnou pod 28 HRC. Současně by bylo provést analýzu následného nýtovaného spoje a také důkladnou mechanickou zkoušku spoje.

4.4. Průběh tvrdosti od špičky dílu

Achse Ziehkeil – díl s proticementační pastou

Jako další krok bylo na 4 dílech provedeno měření tvrdosti HRC. Tvrdost byla měřena v 6 různých vzdálenostech od konce dílu ze všech 4 stran součásti.

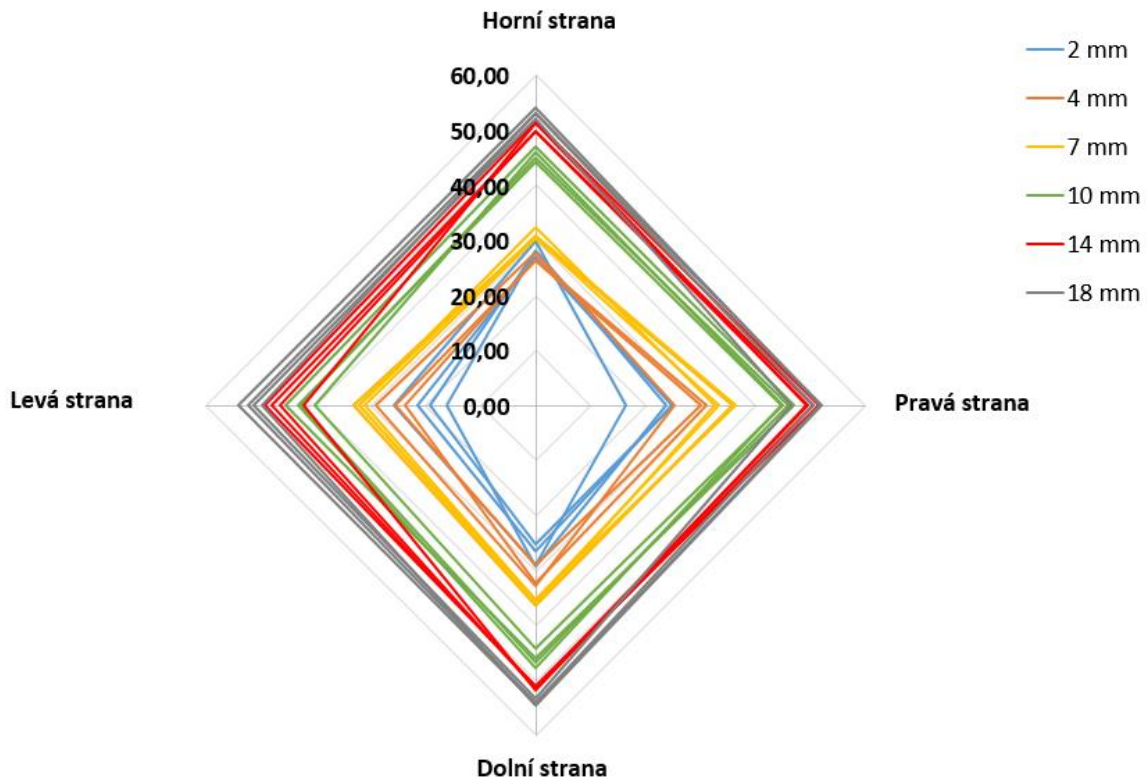


Obrázek 4. 30 Průběh tvrdosti od špičky dílu s proticementační ochrannou pastou

Na obrázku 4. 30 jsou graficky zobrazeny hodnoty průběhu tvrdosti dílu s proticementační pastou. Hodnoty jsou číselně uvedeny v příloze 5. Pro každou stranu jsou v grafu 4 křivky – jedna pro každý díl. Z obrázku je vidět, že materiál je

tepelně ovlivněn induktorem do vzdálenosti cca 10 mm. Pro nýtování je důležitá oblast do 4 mm, ve které se pohybujeme v předepsaném požadavku.

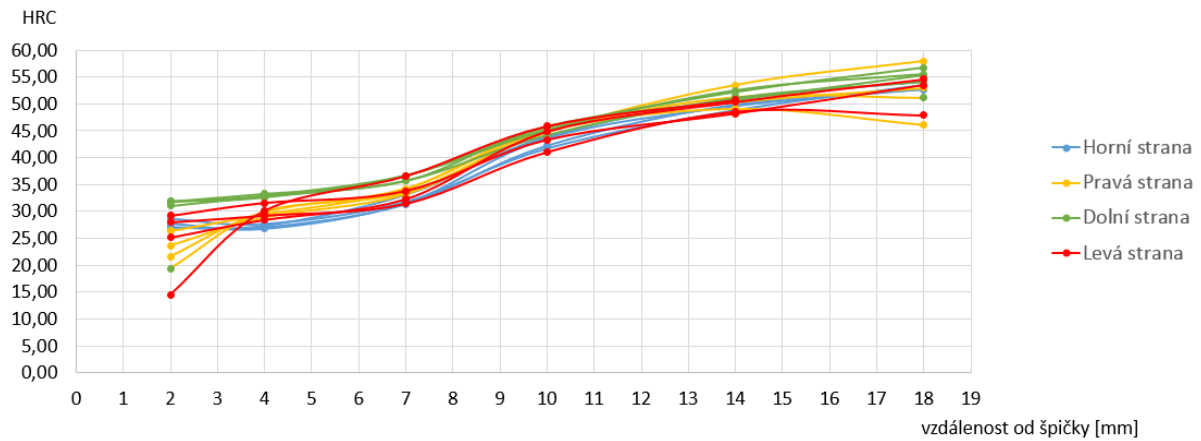
Na obrázku 4. 31 je paprskový graf, který zobrazuje, jak je při ohřevu rozloženo teplotní pole. Je zřejmé, že celkově se pole na pravé a levé straně neliší, jen horní a dolní strana, to znamená, že se liší tvrdost, jak je zmíněno v bodě 4.3.3. – podle konstrukce induktoru (2 průřezy induktoru vpředu a 1 průřez induktoru vzadu).



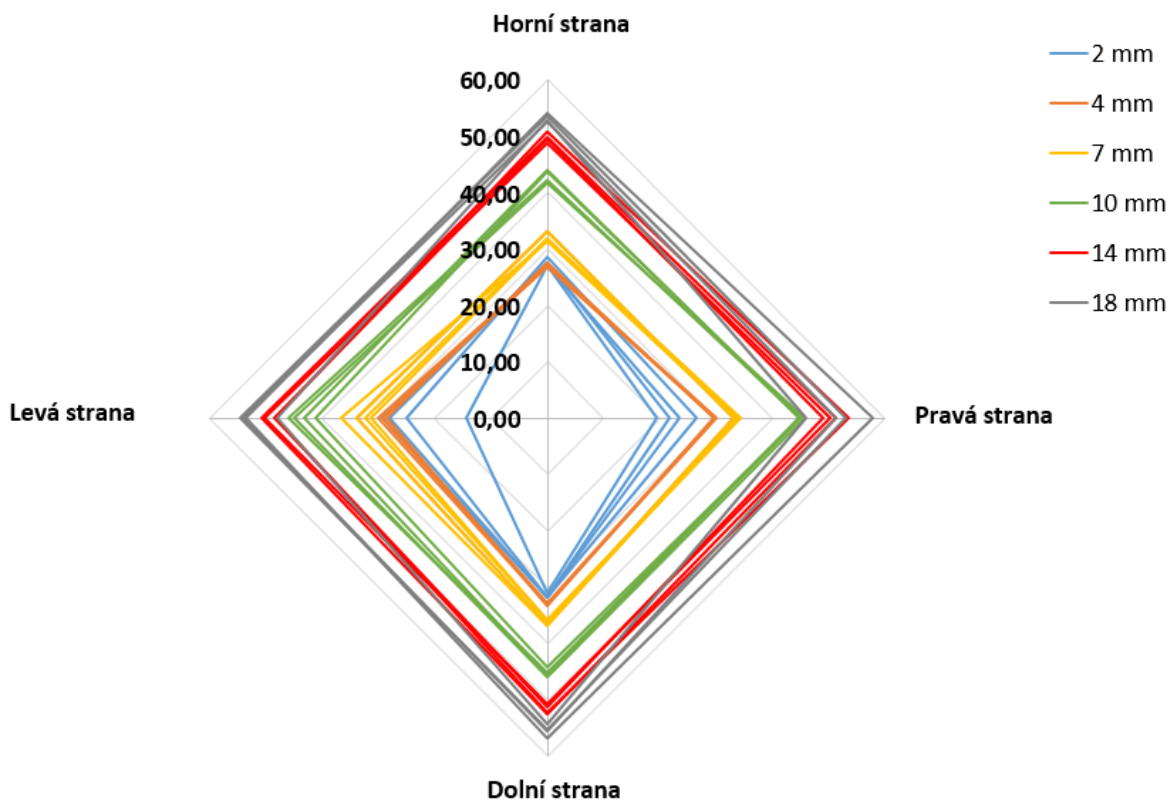
Obrázek 4. 31 Rozložení pole ohřevu v induktoru

Achse Ziehkeil – díl bez proticementační pasty

Stejné měření průběhu tvrdosti od špičky dílu bylo provedeno u dílů bez proticementační pasty při optimálních parametrech, které byly uvedeny výše.



Obrázek 4. 32 Průběh tvrdosti od špičky dílu bez proticementační pasty



Obrázek 4. 33 Rozložení pole ohřevu v induktoru

Na obrázku 4. 32 je vidět, že rozptyl hodnot u dílu bez proticementační pasty není tak veliký jako u dílů s proticementační pastou. Hodnoty tvrdosti HRC se pohybují na horní hranici požadavku na tvrdost – tedy 28 HRC a výš. Naměřené hodnoty jsou uvedeny v příloze 6.

Z obrázku 4. 33 vyplývá, že teplotní pole zůstává přibližně stejné jako v případě dílů s proticementační pastou.

Pro definitivní rozhodnutí zda-li je vhodné používat takovéto díly v sériové výrobě by bylo nutné provedení kontroly a analýzy roznýtovaného konce dílu.

Z časových důvodů nebylo možné v rámci mé diplomové práce provést analýzu a kontrolo roznýtovaných konců.

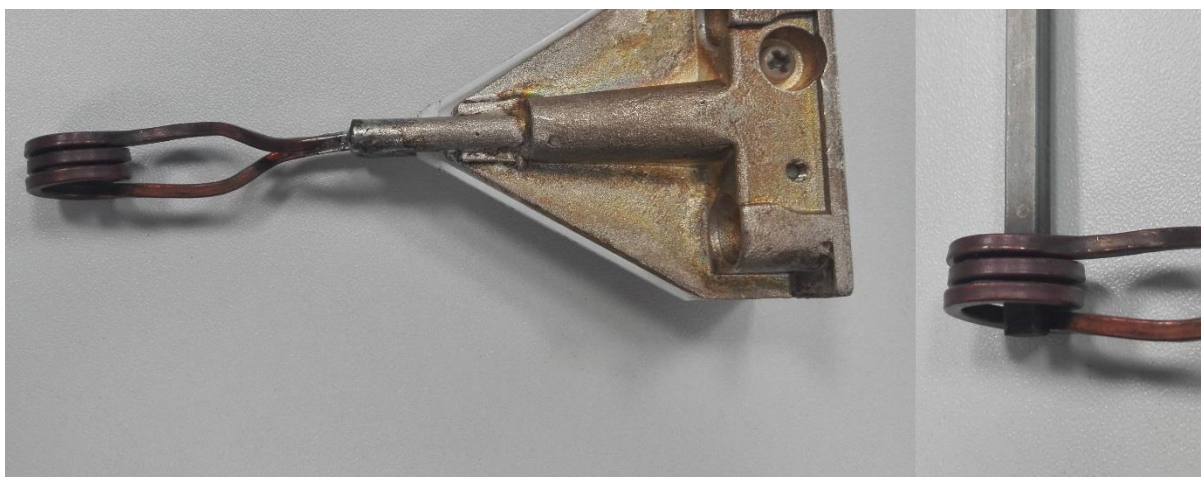
5. Závěr

Cíl diplomové práce byl splněn. Byl proveden pracovní cyklus indukčního popouštění pro díl s proticementační pastou a díl bez proticementační pasty. Na základě získaných hodnot byly stanoveny optimální parametry, které jsou znovu uvedeny níže:

	E [V·m ⁻¹]	t [s]
Díl s proticementační pastou	1,2	3,4
Díl bez proticementační pasty	1,3	4,0

Tabulka 5. 1 Shrnutí optimálních parametrů

U dílů s proticementační pastou doporučuji při zvolených optimálních parametrech upravit konstrukčně tvar induktoru tak, aby ohřev byl rovnoměrný a špička dílu dosahovala v celém ohřívaném objemu pokud možno stejnou tvrdost. Jedna z možných konstrukčních úprav induktoru je na uvedena na obrázku 5. 1.



Obrázek 5. 1 Možná konstrukční úprava induktoru

U dílu bez proticementační pasty se nejedná o zcela optimální parametry z důvodu naměřených hodnot tvrdosti nad hranicí 28 HRC.

Povrchové tvrdosti byly měřeny metodou HRC. Průběhy tvrdosti směrem do jádra na metalografických výbrusech byly dle normy měřeny metodou HV. Pro porovnání je převodní tabulka mezi tvrdostmi HRC a HV uvedena v příloze 7.

Společnost KERN-LIEBERS CR spol. s r.o. se snaží vzhledem k efektivnosti nalézt řešení, jak vyrábět díl bez použití proticementační pasty. Jedním z řešení by byla investice do zařízení, které by dokázalo indukčně popustit díly bez

proticementační pasty tak, aby se tvrdost na špičce dílu pohybovala v požadovaném rozsahu 24 ± 4 HRC.

Na toto zařízení musí být kladeny určité požadavky. Zařízení musí disponovat vysokofrekvenčními charakteristikami, kontrolovaným indukčním procesem a řízeným výkonem generátoru, aby díly chladly kontrolovaně.

V rámci diplomové práce jsem měl možnost pracovat i se vzorky od potenciálního výrobce takového zařízení. Tyto výsledky budou rozebrány v následujícím bodě 5.1.

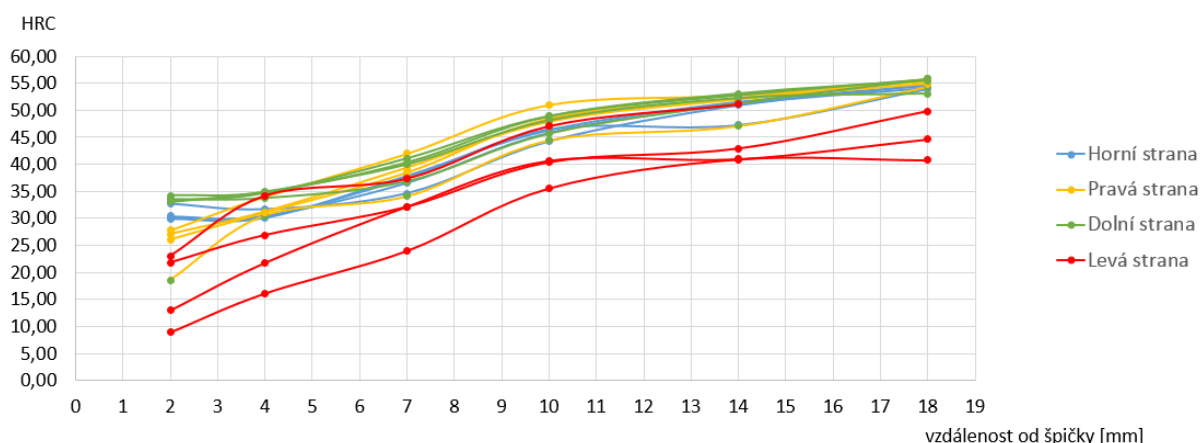
5.1. Achse Ziehkeil – vzorky bez proticementační pasty

Během řešení problematiky se naskytla možnost využít a změřit vzorové díly od potenciálního výrobce nového zařízení.

Pro analýzu byly k dispozici 4 díly a měření bylo provedeno identicky v 6 definovaných vzdálenostech od konce špičky dílu a ze všech 4 stran. Naměřené hodnoty jsou graficky zpracovány na následujícím obrázku. Rozptyl hodnot je větší než u dílů s proticementační pastou indukčně popuštěných na indukčním zařízení společnosti KERN-LIEBERS CR spol. s r.o.

O pracovním cyklu indukčního popouštění od tohoto potenciálního výrobce lze sdělit jen, že pracovní cyklus trval 2,5 sekundy, a že zařízení disponuje oválným induktorem, který dokáže dělat 2 díly současně (jsou umístěny vedle sebe). Pravý díl je tedy obklopen induktorem zepředu, zezadu a z pravé strany a levý díl je obklopen induktorem zepředu, zezadu a z levé strany. Z toho důvodu se u změřených dílů lišily tvrdosti na prostřední straně, kde nebyl přítomen závit induktoru.

Celkově mají tyto vzorky stejnou nebo horší úroveň jako vzorky indukčně popuštěné na současném zařízení. Pokud by se mělo přejít na díly bez proticementační pasty, bylo by potřeba vybrat vhodnější zřízení nebo zlepšit řízení procesu indukčního popouštění, aby byly zajištěny požadované hodnoty tvrdosti.



Obrázek 5. 2 Vzorové díly poslané od potenciálního výrobce nového zařízení

Použitá literatura

- [1] Users.fs.cvut.cz. (2018). *Nauka o materiálu*. [online] Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/mattech/01_Materialem%20letem%20svetem.pdf [Citováno 1. února 2018].
- [2] Kmt.tul.cz. (2018). *Pece*. [online] Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_bakalari/TZZ/pece.pdf [Citováno 1. února 2018].
- [3] Rosecká, E. (2013). *Tepelné zpracování ocelí*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [4] MachineMfg.com. (2018). *What Is Annealing and 7 Types of Annealing Process | MachineMfg.com*. [online] Dostupné z: <https://www.machinemfg.com/annealing/> [Citováno 1. února 2018].
- [5] Hromada, M. (2013). *Povrchové kalení ocelí vláknovým YBYAG laserem*. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [6] Chmel, D. (2013). *Simulace tepelného zpracování tyčové oceli na indukčních zušlechťovacích linkách*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [7] Kmt.tul.cz. (2018). *Popouštění oceli*. [online] Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/TTZ/ttz%20Dad/popoceli.pdf [Citováno 1. února 2018].
- [8] ASM International Handbook Committee. (1991). *ASM Handbook, Volume 04 - Heat Treating*. [Neznámé místo vydání]: ASM International.
- [9] Abu Khait, Y. (2016). *Deformace nástrojových ocelí po kalení ve vakuových pecích*. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [10] Inductotherm Group. (2018). *Basics of Induction Heating Technology - Radyne Corporation*. [online] Available at: <https://radyne.com/what-is-induction/induction-heating-basics/> [Accessed 12 Jun. 2018].

- [11] Uhlíř, M. (2012). *Indukční ohřevy ve strojírenství*. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [12] Cognito.cz, s. and Cognito.cz, s. (2018). *Indukční ohřev, kalení | RAJMONT s.r.o.* [online] Rajmont.cz. Dostupné z: <http://www.rajmont.cz/> [Citováno 1. února 2018].
- [13] Vitouš, O. (2015). *Indukční ohřev těles se silně zakřivenými plochami*. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.
- [14] Infohouse.p2ric.org. (2018). [online] Dostupné z: <http://infohouse.p2ric.org/ref/09/08912.pdf> [Citováno 30. května 2018].
- [15] Bolzano.cz. (2018). *Bolzano | Přehled vlastností oceli 16MnCr5*. [online] Dostupné z: http://www.bolzano.cz/assets/files/TP/MOP_%20Tycova_ocel/EN_10084/MOP_16MnCr5.pdf [Citováno 1. února 2018].
- [16] Interquality.cz. (2018). *DOE- Několik otázek a odpovědí o statisticky navrženém experimentu*. [online] Dostupné z: <http://www.interquality.cz/INTERN%C3%8DKURZY/DOEInterquality/tabid/79/Default.aspx> [Citováno 9. dubna 2018].
- [17] Isixsigma.com. (2018). *Design of Experiments – A Primer*. [online] Dostupné z: <https://www.isixsigma.com/tools-templates/design-of-experiments-doe/design-experiments-%E2%90%93-primer/> [Citováno 9. dubna 2018].
- [18] *EN ISO 6508: Metallic materials — Rockwell hardness test*. 1. Švýcarsko: International Organization for Standardization, 2005.
- [19] Magmaweld.com. (2018). *Hardness Conversion Table*. [online] Dostupné z: http://www.magmaweld.com/hardness_conversion_table.html [Citováno 30. května 2018].

Použitá zařízení

1. Indukční zařízení
Polovodičový generátor řady HFR – HFR 15
RAJMONT s.r.o.
2. Makrotvrdost
Tvrdoměr Q-Ness Q250
Qness GmbH
3. Mikrotvrdost
Tvrdoměr Q-Ness Q10
Qness GmbH
4. Rozbrušovací zařízení
Brillant 250.3
ATM GmbH
5. Zalévací pícka
OPAL 450
ATM GmbH
6. Leštička
SAPHIR 330, RUBIN 500
ATM GmbH

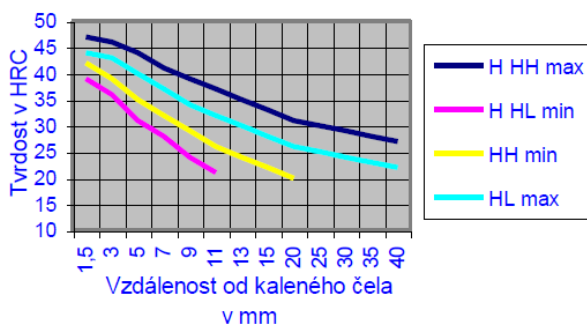
Přílohy

Příloha 1

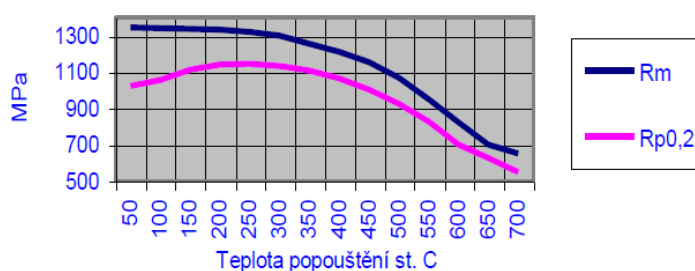
Materiálový list pro ocel 16MnCr5 [13]

Přehled vlastností oceli 16MnCr5 (16MnCrS5)									1.7131 (1.7139)						
Druh oceli	Nízkolegovaná ušlechtilá mangan-chromová ocel k cementování														
TDP	ČSN EN 10084														
Dřívější označení	16MnCr5 (16MnCrS5) podle DIN 17210, 14 220 podle ČSN														
Charakteristika	Nejčastěji používaná cementační ocel pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Prokaluje do hloubky ca 30 mm. Ve stavu kaleném a popuštěném je použitelná pro průměry do ca 35 mm. Je svařitelná a vhodně tepelně zpracovaná též dobře tvařitelná za studena. Přísadou bóru (0,0008 až 0,0050%) se docílí zvýšené houževnatosti cementované vrstvy.														
Chemické složení v % hmot. (rozbor tavby)	C	Si max.	Mn	P max.	S ¹⁾ max.	Cr	Mo	Ni	Al						
	0,14-0,19	0,40	1,00 – 1,30	0,035	0,035	0,80 – 1,10	-	-	Při kontrolované velikosti austenitického zrna 0,015-0,050 (informativně; není uvedeno v normě).						
Dovolené odchylky od složení tavby ve výrobku ⁴⁾	± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	-	-							
Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popuštění při 150-200 °C (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084) ²⁾	Průměr v mm		Re min. MPa		Rm MPa		A min %		Z min %		KCU min. J.cm ⁻²				
	d ≤ 11		735		1030 – 1375		8		-		25				
	11 < d ≤ 25		540		785 – 1080		9		-		30				
25 < d ≤ 40		490		685 - 930		10		-		30					
Hodnoty tvrdosti HB pro stav :	Zpracováno na stříhatelnost (S)			Žitáno na měkko (A)			Zpracováno na rozmezí tvrdosti (TH)			Zpracováno na feriticko-perlitickou strukturu (FP)					
	max. 255			max. 207			156 - 207			140 - 187					
	Stav po válcování			Stav po normalizaci			Žitáno na globulární cementit (vhodné pro tváření za studena)								
	ca 250 ⁵⁾			ca 220 ⁵⁾			max. 178 ⁵⁾								
Prokalitelnost	Druh	Meze	Vzdálenost od plochy kaleného čela v mm												
			Tvrdost v HRC												
	H	max.	47	46	44	41	39	37	35	33	31	30	29	28	27
		min.	39	36	31	28	24	21	-	-	-	-	-	-	-
	HH	max.	47	46	44	41	39	37	35	33	31	30	29	28	27
		min.	42	39	35	32	29	26	24	22	20	-	-	-	-
HL	max.	44	43	40	37	34	32	30	28	26	25	24	23	22	
	min.	39	36	31	28	24	21	-	-	-	-	-	-	-	

Pásy prokalitelnosti



Popuštěcí křivka (referenční vzorek pr.10 mm)



Technologické vlastnosti								
Tváření za tepla	Doporučené rozmezí teplot pro tváření za tepla : 1100 až 900 °C							
Tepelné zpracování	Normalizační žihání °C	Žihání na měkko °C	Isotermické žihání	Teplota cementace °C a)	Teplota kalení na jádro °C b)	Teplota kalení na povrch °C b)	Teplota popouštění °C c)	Teplota kalení pro Jominyho zkoušku °C
	880	650 až 700	850 až 950 650 1 hod.	880 až 980	860 – 900 olej, (voda)	780 až 820 olej, (voda)	150 až 200	870 (prodleva ca 0,5 h)
	Uvedené podmínky jsou doporučené. a) při jednoduchém kalení se ocel kalí z teploty cementace nebo nižší (závisí na tvaru výrobku) b) druh ochlazovacího prostředí závisí na př. na tvaru výrobku a na podmínkách ochlazování. c) doba popouštění minimálně 1 hod.							
Obrobitelnost	Pro dobrou obrobitelnost je výhodný stav FP. Zlepšenou obrobitelnost vykazuje ocel 16MnCrS5 se zvýšeným obsahem S.							
Střihatelnost	Ocel 16MnCr5 je střihatelna za studena i ve stavu po válcování.							
1) Obsah síry u oceli 16MnCrS5 je 0,020 až 0,040% s dovolenou odchylkou v hotovém výrobku $\pm 0,005$ %. 2) Prokazují se na referenčním vzorku uvedených průměrů. Slouží k průkazu dosažitelnosti mechanických hodnot v jádře po kalení a popouštění. Údaje jsou převzaty z literatury. Re – mez kluzu, Rm – pevnost v tahu, A – tažnost (počáteční měřená délka $L_0 = 5,65\sqrt{S_0}$), Z – kontrakce, KCU – nárazová práce, zkušební těleso s U – vrubem (průměr ze tří zjištěných hodnot, z nichž žádná nesmí být menší než 70% střední hodnoty). 3) pro ocel objednanou bez požadavku na prokalitelnost jsou hodnoty prokalitelnosti pouze informativní. 4) ± znamená, že u jedné tavby smí být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí rozboru tavby, ale nikoli obě současně. 5) Uvedené údaje jsou informativní a nejsou součástí EN 10084								

Příloha 2

Hledání optimálních parametrů - naměřené hodnoty – díl s proticementační pastou

Čas t [s]	Intenzita E [V.m ⁻¹]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Tvrдость HRC		Průměrná tvrдость HRC	
				Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana
3,0	1,0	71	18	35,21	36,09	35,23	35,92
				35,24	35,29		
				35,24	36,37		
3,2	1,0	71	18	35,57	35,72	34,66	34,13
				34,13	33,28		
				34,28	33,38		
3,4	1,0	71	18	32,30	31,14	32,03	32,05
				33,03	32,27		
				30,76	32,75		
3,6	1,0	71	18	32,30	30,34	31,45	30,88
				31,62	31,12		
				30,44	31,17		
3,8	1,0	71	18	29,38	28,55	28,37	28,71
				26,89	29,03		
				28,83	28,55		
4,0	1,0	71	18	27,62	27,87	26,95	26,44
				26,29	24,95		
				26,94	26,49		
3,0	1,2	77	20	31,74	30,51	32,71	31,28
				33,20	32,32		
				33,18	31,01		
3,2	1,2	77	20	28,27	28,48	28,74	29,13
				29,81	30,74		
				28,15	28,17		
3,4	1,2	77	20	26,69	25,53	27,23	26,71
				28,15	27,37		
				26,84	27,24		
3,6	1,2	77	20	24,60	23,70	24,55	24,04
				25,21	24,08		
				23,85	24,33		
3,8	1,2	77	20	20,78	22,88	21,01	22,39
				21,20	22,68		
				21,05	21,62		
4,0	1,2	77	20	20,88	25,06	20,44	21,65
				20,70	19,55		
				19,75	20,35		

3,0	1,3	81	20	30,11	28,93	30,55	30,08
				30,41	30,99		
				31,12	30,31		
3,2	1,3	81	20	28,50	27,34	26,84	26,94
				26,31	26,54		
				25,71	26,94		
3,4	1,3	81	20	23,98	22,60	23,03	23,01
				22,00	22,70		
				23,10	23,72		
3,6	1,3	81	20	21,52	21,05	21,42	21,09
				21,28	21,10		
				21,45	21,12		
3,8	1,3	81	20	16,92	19,60	18,20	19,43
				19,02	20,10		
				18,65	18,60		
4,0	1,3	81	20	19,18	20,72	17,08	20,54
				14,30	20,52		
				17,75	20,38		
3,0	1,4	84	21	27,62	28,07	26,90	26,85
				27,14	26,61		
				25,94	25,86		
3,2	1,4	84	21	23,62	24,63	23,44	23,50
				23,12	23,52		
				23,58	22,35		
3,4	1,4	84	21	21,35	21,82	21,46	21,61
				21,30	22,58		
				21,72	20,42		
3,6	1,4	84	21	18,62	20,72	18,76	20,34
				19,10	19,12		
				18,55	21,18		
3,8	1,4	84	21	16,58	20,48	17,24	21,06
				18,95	21,22		
				16,20	21,48		
4,0	1,4	84	21	18,12	21,32	17,77	21,27
				17,60	21,38		
				17,58	21,12		

Příloha 3

Hledání optimálních parametrů – naměřené hodnoty – díl s proticementační pastou – 2. krok

Čas t [s]	Intenzita E [V.m ⁻¹]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Tvrdost HRC		Průměrná tvrdost HRC	
				Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana
3,2	1,2	77	20	28,00	29,05	27,65	28,96
				27,75	28,02		
				25,61	27,14		
				28,12	29,93		
				28,45	28,40		
				27,29	29,78		
				28,32	30,39		
3,4	1,2	77	20	24,38	25,66	22,87	26,10
				23,80	28,00		
				23,00	27,82		
				21,52	25,94		
				17,32	24,03		
				24,98	26,09		
				25,11	25,16		
3,6	1,2	77	20	22,18	23,18	21,91	24,22
				21,60	24,55		
				24,65	26,11		
				21,82	23,80		
				21,38	24,13		
				21,58	24,73		
				20,18	23,02		
3,8	1,2	77	20	17,15	19,80	18,41	21,28
				17,92	21,22		
				19,38	21,45		
				17,65	20,32		
				19,70	22,12		
				19,40	22,25		
				17,65	21,80		
3,2	1,3	81	20	24,10	26,19	23,34	26,48
				23,05	27,85		
				23,38	25,21		
				22,20	25,99		
				21,40	26,14		

				24,88	27,57		
				24,38	26,41		
3,4	1,3	81	20	20,90	21,55	20,14	23,18
				21,12	23,15		
				19,88	23,68		
				19,00	22,12		
				19,62	25,56		
				19,98	22,30		
				20,50	23,90		
3,6	1,3	81	20	18,62	21,95	18,72	21,70
				18,20	21,40		
				19,60	19,90		
				18,12	21,80		
				19,30	22,10		
				19,15	23,88		
				18,02	20,88		
3,8	1,3	81	20	17,48	21,05	17,09	20,89
				16,52	20,10		
				17,00	21,45		
				17,28	21,75		
				17,52	19,88		
				17,95	18,98		
				15,85	23,02		
3,2	1,4	84	21	21,18	26,24	21,35	24,95
				22,72	25,64		
				20,92	23,80		
				21,38	23,90		
				20,18	24,38		
				22,32	25,71		
				20,72	24,98		
3,4	1,4	84	21	17,85	21,42	17,53	21,75
				17,65	21,50		
				17,55	23,60		
				18,20	20,45		
				16,02	20,90		
				17,00	21,55		
				18,45	22,85		
3,6	1,4	84	21	14,32	20,98	15,72	20,49
				15,38	20,55		
				15,98	18,60		
				16,20	21,55		
				16,02	20,40		
				16,52	21,20		
				15,65	20,18		

3,8	1,4	84	21	14,80	19,45	14,67	19,75
				15,10	19,28		
				14,92	20,12		
				13,82	18,65		
				13,70	19,60		
				14,22	22,65		
				16,10	18,52		

Příloha 4

Hledání optimálních parametrů – naměřené hodnoty – díl bez proticementační pasty

Čas t [s]	Intenzita E [V.m ⁻¹]	Napětí U [V]	Proud I [A]	Tvrdość HRC		Průměrná tvrdość HRC	
				Horní strana	Spodní strana	Horní strana	Spodní strana
3,0	1,0	71	18	44,80	49,31	44,96	49,40
				45,84	49,72		
				44,24	49,18		
3,2	1,0	71	18	42,51	48,53	43,05	47,74
				43,00	46,07		
				43,63	48,63		
3,4	1,0	71	18	41,65	46,32	41,70	45,92
				41,58	46,01		
				41,88	45,43		
3,6	1,0	71	18	40,95	45,23	39,74	44,11
				38,91	43,53		
				39,36	43,58		
3,8	1,0	71	18	36,92	40,35	37,80	41,59
				37,83	42,26		
				38,66	42,16		
4,0	1,0	71	18	36,02	39,89	35,29	40,06
				35,49	40,02		
				34,36	40,27		
3,0	1,2	77	20	40,97	44,82	41,43	45,14
				41,78	45,10		
				41,55	45,51		
3,2	1,2	77	20	50,17	43,83	41,88	39,62
				38,56	42,87		
				36,90	32,15		
3,4	1,2	77	20	35,16	39,46	35,83	40,34
				36,98	40,95		
				35,34	40,62		
3,6	1,2	77	20	34,11	39,31	34,13	38,57
				33,13	38,21		
				35,14	38,18		
3,8	1,2	77	20	30,86	36,02	31,41	36,34
				31,49	36,92		
				31,87	36,07		
4,0	1,2	77	20	27,42	33,73	28,61	30,86
				29,23	34,33		
				29,18	24,51		

3,0	1,3	81	20	40,52	44,85	39,13	44,00
				38,42	43,05		
				38,46	44,09		
3,2	1,3	81	20	36,87	40,97	36,20	40,73
				36,40	40,67		
				35,32	40,55		
3,4	1,3	81	20	34,16	38,78	33,29	38,18
				32,35	37,88		
				33,35	37,88		
3,6	1,3	81	20	30,84	36,14	31,01	35,87
				30,89	35,39		
				31,29	36,09		
3,8	1,3	81	20	30,49	34,59	29,26	33,66
				29,03	33,98		
				28,25	32,40		
4,0	1,3	81	20	29,61	32,70	27,29	33,68
				25,08	32,80		
				27,19	35,54		
3,0	1,4	84	21	36,75	41,71	36,92	41,16
				36,62	41,38		
				37,40	40,39		
3,2	1,4	84	21	32,80	37,73	33,65	38,55
				34,51	39,31		
				33,63	38,61		
3,4	1,4	84	21	31,01	35,69	31,15	35,67
				31,69	35,94		
				30,76	35,37		
3,6	1,4	84	21	27,85	32,57	28,47	33,45
				28,63	33,83		
				28,93	33,96		
3,8	1,4	84	21	30,51	37,75	29,14	35,48
				30,08	36,77		
				26,84	31,92		
4,0	1,4	84	21	31,97	34,06	34,23	37,44
				38,58	42,67		
				32,15	35,59		

Příloha 5

Průběh tvrdosti od špičky pro díly s proticementační pastou

vzdálenost od špičky [mm]→		2	4	7	10	14	18
číslo dílu ↓, strana dílu ↓							
1	horní	28,07	26,66	30,39	44,27	49,79	53,12
	pravá	23,82	30,99	33,45	44,60	50,56	52,10
	dolní	29,31	32,22	35,21	47,56	51,34	54,46
	levá	16,12	23,82	31,19	43,23	46,37	49,69
2	horní	27,22	26,39	30,81	47,01	51,62	54,01
	pravá	24,63	30,13	36,35	47,01	51,62	51,82
	dolní	26,39	28,98	35,29	45,94	50,91	54,26
	levá	21,40	25,46	32,07	45,56	49,36	53,95
3	horní	28,17	26,49	30,61	44,93	49,79	52,15
	pravá	25,06	30,54	35,77	45,86	49,47	46,35
	dolní	25,28	30,96	36,35	46,55	51,29	53,19
	levá	19,10	27,47	33,18	42,77	47,99	51,19
4	horní	29,99	27,80	32,45	46,04	51,37	53,07
	pravá	16,42	25,31	32,60	44,87	49,26	50,43
	dolní	28,90	32,85	35,94	44,04	51,77	53,90
	levá	25,89	29,13	32,15	40,19	42,29	52,31

Příloha 6

Průběh tvrdosti od špičky pro díly bez proticementační pasty

vzdálenost od špičky [mm]→		2	4	7	10	14	18
číslo dílu ↓, strana dílu ↓							
1	horní	27,70	26,74	31,54	43,66	49,67	52,79
	pravá	21,62	29,83	34,23	44,98	49,08	46,07
	dolní	31,85	32,88	35,74	44,22	51,12	54,16
	levá	27,95	29,20	31,42	41,05	48,58	47,87
2	horní	27,12	27,12	31,37	42,21	49,82	52,61
	pravá	19,38	29,98	33,58	44,85	51,34	51,19
	dolní	30,99	32,90	36,67	45,08	52,46	55,48
	levá	14,50	30,13	36,60	45,91	50,76	53,95
3	horní	26,99	27,39	33,13	43,96	50,96	54,16
	pravá	23,58	28,80	33,13	44,67	53,45	57,91
	dolní	31,79	32,57	36,60	45,51	52,15	56,69
	levá	29,20	31,59	33,81	43,30	48,15	53,45
4	horní	28,60	27,65	31,79	41,76	48,91	53,62
	pravá	26,39	29,51	34,18	45,74	50,35	52,94
	dolní	31,84	33,28	35,67	45,79	50,66	55,27
	levá	25,13	28,42	32,30	44,85	50,35	54,56

Příloha 7

Převodní tabulka tvrdosti HRC na HV [19]

TENSILE STRENGTH (N/mm ²)	VICKERS HARDNESS (HV)	BRINELL HARDNESS (HB)	ROCKWELL HARDNESS (HRC)
320	100	95	-
335	105	99.8	-
350	110	105	-
370	115	109	-
385	120	115	-
400	125	119	-
415	130	124	-
430	135	128	-
450	140	133	-
465	145	138	-
480	150	143	-
495	155	147	-
510	160	152	-
530	165	156	-
545	170	162	-
560	175	166	-
575	180	171	-
595	185	176	-
610	190	181	-
625	195	185	-
640	200	190	-
660	205	195	-
675	210	199	-
690	215	204	-
705	220	209	-
720	225	214	-
740	230	219	-
755	235	223	-

TENSILE STRENGTH (N/mm ²)	VICKERS HARDNESS (HV)	BRINELL HARDNESS (HB)	ROCKWELL HARDNESS (HRC)
770	240	228	20.3
785	245	233	21.3
800	250	238	22.2
820	255	242	23.1
835	260	247	24.0
850	265	252	24.8
865	270	257	25.6
880	275	261	26.4
900	280	266	27.1
915	285	271	27.8
930	290	276	28.5
950	295	280	29.2
965	300	285	29.8
995	310	295	31.0
1030	320	304	32.2
1060	330	314	33.3
1095	340	323	33.4
1125	350	333	33.5

TENSILE STRENGTH (N/mm2)	VICKERS HARDNESS (HV)	BRINELL HARDNESS (HB)	ROCKWELL HARDNESS (HRc)
1155	360	342	36.6
1190	370	352	37.7
1220	380	361	38.8
1255	390	371	39.8
1290	400	380	40.8
1320	410	390	41.8
1350	420	399	42.7
1385	430	409	43.6
1420	440	418	44.5
1455	450	428	45.3
1485	460	437	46.1
1520	470	447	46.9
1555	480	(456)	47.7
1595	490	(466)	48.4
1630	500	(476)	49.1
1665	510	(485)	49.8
1700	520	(494)	50.5
1740	530	(504)	51.1
1775	540	(513)	51.7
1810	550	(523)	52.3
1845	560	(532)	53.0
1880	570	(542)	53.6
1920	580	(551)	54.1
1955	590	(561)	54.7
1995	600	(570)	55.2
2030	610	(580)	55.7
2070	620	(589)	56.3
2105	630	(599)	56.8

TENSILE STRENGTH (N/mm2)	VICKERS HARDNESS (HV)	BRINELL HARDNESS (HB)	ROCKWELL HARDNESS (HRc)
2145	640	(608)	57.3
2180	650	(618)	57.8
-	660	-	58.3
-	670	-	58.8
-	680	-	59.2
-	690	-	59.7
-	700	-	60.1
-	720	-	61.0
-	740	-	61.8
-	760	-	62.5
-	780	-	63.3
-	800	-	64.0
-	820	-	64.7
-	840	-	65.3