



**TECHNICKÁ UNIVERZITA V
LIBERCI
Fakulta strojní**

Katedra materiálu

Petr Lipenský

Studijní program: **B 2341 Strojírenství**

Studijní obor: **3911 R018 Materiály a technologie**

Zaměření: **Materiálové inženýrství**

Bakalářská práce na téma:

**Studium karbonitridovaných vrstev součástek
převodovky MQ 200**

Bachelor's thesis:

Study of nitrocarburized layers of parts of MQ 200 gear-box

Vedoucí práce: Doc. Ing. František Stuchlík, CSc.

Počet stran textu: 48

Počet obrázků: 31

Počet tabulek: 14

Počet grafů: 6

Anotace

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s procesy chemicko-tepelného zpracování a zvláště pak s teorií karbonitridace. Na vzorcích jsou vyhodnocovány vlastnosti karbonitridované vrstvy a porovnávány s vlastnostmi nitrocementovaného vzorku. Vzorky jsou součástí převodovky MQ 200 firmy Škoda-Auto a.s..

Teoretické části jsou popsány procesy chemicko-tepelného zpracování, s důrazem kladeným na karbonitridaci v plynné atmosféře.

V experimentální části jsou vyhodnocovány karbonitridované a nitrocementované vzorky.

Závěr vyhodnocuje získané informace.

Annotation

The intention of this thesis is to study processes of thermochemical surface treatment, especially the proces of nitrocarburizing. Attributes of nitrocarburized layers are evaluated on specimens and are compared to attributes of carbonitrided layers. Specimens are parts of MQ 200 gear-box.

Processes of thermochemical surface treatment with stress put on gas nitrocarburizing are described in the theoretic part.

Nitrocarburized and carbonitrided specimens are evaluated in the experimental part.

Acquired informations are analyzed in the conclusion.

Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím , že na mou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 - školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická universita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li bakalářskou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL. V tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím bakalářské práce a konzultantem.

Datum: 25.5. 2005

Podpis:

Touto cestou bych chtěl vyjádřit poděkování vedoucímu mé bakalářské práce panu Doc. Ing. Františku Stuchlíkovi, CSc. za podnětné rady a připomínky. Nemalý dík patří také panu Ing. Kubíčkoví a paní Ing. Čílové za pomoc při experimentální části. A v neposlední řadě též panu Dr. Rolandu Dorka z firmy Spectruma Analytik GmbH.

OBSAH

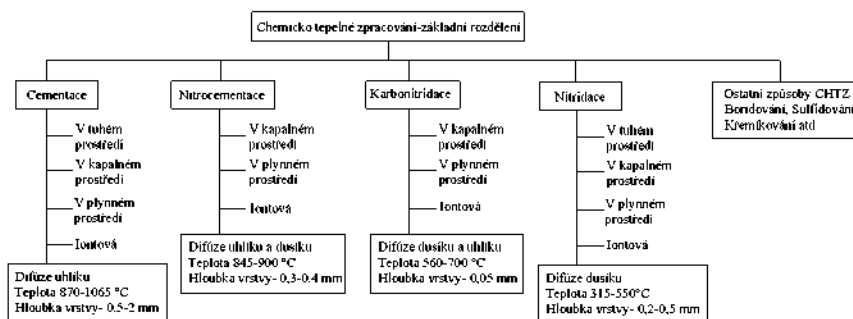
1. Úvod	2
2. Teoretická část	3
2.1. Historie Chemicko-tepelného zpracování	3
2.2. Porovnání cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace	4
2.2.1. Cementace	4
2.2.2. Nitridace	5
2.2.3. Nitrocementace	6
2.2.4. Karbonitridace	6
2.2.5. Shrnutí základních parametrů procesů cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace	6
2.3. Metody karbonitridace	7
2.3.1. Karbonitridace v kapalném prostředí	7
2.3.2. Karbonitridace v plynné atmosféře	10
2.3.3. Plasmová karbonitridace	11
2.3.4. Výsledné shrnutí metod karbonitridace	14
2.4. Rovnovážné soustavy Fe-C, Fe-N a Fe-C-N	14
2.5. Fyzikální a chemické děje při karbonitridaci	17
2.5.1. Sycení uhlíkem	17
2.5.2. Sycení dusíkem	21
2.5.3. Děje na fázovém rozhraní	23
2.5.4. Difúze uhlíku a dusíku v austenitu	25
2.6. Kinetika růstu vrstvy ϵ karbonitridu	26
2.7. Vliv atmosféry na kinetiku růstu vrstvy ϵ karbonitridu	27
3. Experimentální část	28
3.1. Popis zkoumaných vzorků	28
3.2. Popis procesů karbonitridace a nitrocementace ve firmě Škoda-Auto	29
3.3. Experimentální metodika	30
3.3.1. Metalografická analýza	30
3.3.2. Měření tvrdosti a mikrotvrdosti	30
3.3.3. Mikroanalýza chemického složení	31
3.4. Výsledky a diskuze	31
3.4.1. Karbonitridovaný vzorek	31
3.4.2. Nitrocementovaný vzorek	35
3.4.3. Mikroanalýza chemického složení	39
4. Rozbor získaných výsledků	40
4.1. Karbonitridovaný vzorek	40
4.2. Nitrocementovaný vzorek	41
5. Závěr	42
6. Seznamy	43
6.1. Seznam použitých symbolů	43
6.2. Seznam literatury	43
6.3. Seznam tabulek a grafů	44
6.4. Seznam obrázků	44
6.5. Seznam příloh s obrázky	45
7. Přílohy	46

1. Úvod

V současné době se používá mnoho způsobů a technologií pro úpravu povrchů strojních součástí. Jedním ze způsobů jsou procesy chemicko-tepelného zpracování. Účelem těchto procesů je většinou vytvořit tvrdou vrstvu na povrchu při zachování původních vlastností jádra, zvláště pak houževnatosti, a proto tedy dovoluje výrobcům nahradit drahé materiály levnějšími, které se svými vlastnostmi vyrovnají dražším.

Hlavní druhy chemicko-tepelného zpracování jsou cementace, nitridace, karbonitridace a nitrocementování. Podstatou těchto procesů je sycení povrchu kovu uhlíkem u cementace, dusíkem u nitridace a uhlíkem spolu s dusíkem u karbonitridace a nitrocementace. Všechny tyto procesy probíhají v aktivním prostředí, které může být pevné, kapalné nebo plynné. Celosvětový trend spěje k využívání pouze plynného prostředí jako nejvýhodnějšího z hlediska rychlosti, přesnosti, výrobních nákladů, zdravotní nezávadnosti a ochrany životního prostředí. Princip procesů chemicko-tepelného zpracování spočívá v disociaci aktivního prostředí na atomy sytícího prvku, či prvků, a následné difúzi do povrchu kovu.

Tato práce se zabývá pouze procesem karbonitridace. Jedná se o léty prověřenou metodu, která dosahuje velkého uznání z řad odborné veřejnosti. Zpevnění povrchu je důsledkem tvorby tvrdých fází nitridů a karbonitridů ve vrstvě. Sytícími prvky jsou dusík a uhlík, přičemž větší zastoupení má dusík. Atmosféra je složena z uhlovodíků a čpavku, přičemž samotný proces probíhá při teplotách kolem 550 °C. Výsledná vrstva vzniká bez následného tepelného zpracování - kalení. Karbonitridovaný povrch má tvrdost cca 1000 HV, vynikající korozivzdornost, odolnost proti opotřebení a dobré frikční vlastnosti při nízkých zatíženích. Nevýhodou je malá tloušťka povrchu, kolem 0,05 mm, a s tím spojená nízká únosnost.



Obr. 1: Chemicko-tepelné zpracování- základní rozdělení

2. Teoretická část

2.1. Historie Chemicko-tepelného zpracování

Na počátku bylo karbonitridace dosahováno pomocí solné lázně na principu rozkladu kyanidu na kyanát při nízké teplotě okolo 550 °C (1020 °F). Tato metoda byla nazývána "Sulfinuz". Průkopníkem byla v první polovině minulého století anglická společnost Imperial Chemical Industries. Solná lázeň obsahovala také sloučeniny síry.

Výsledná vrstva se skládala z nitridů a karbidů, vzniklých z kyanidových solí, a sulfidů v případě, že byla požadována samomazací schopnost. Činnost roztavené solné lázně způsobila také mírnou poréznost povrchu ocele. To umožňovalo pórům stát se rezervoáry zadržující mazadlo na povrchu. Výsledkem byla součást s výbornými frikčními vlastnostmi.

Karbonitridované součástky se staly velmi žádanými, především v oblasti vysokootáčkových vřeten a vysokorychlostních řezných nástrojů. Vzhledem k ekologickým problémům s likvidací kyanidových lázní, nutností denně provádět pečlivé analýzy lázně a faktu, že součásti vyžadovaly pečlivé čištění horkou vodou, ačkoliv soli jsou špatně rozpustitelné ve vodě, se hledalo nové řešení. To se našlo v podobě plyných atmosfér. Experimenty, které prováděl ke konci padesátých let minulého století Cyril Dawes z anglické společnosti Joseph Lucas Ltd., vedly až úspěšné registraci patentu v roce 1961.

Porézní vrstva vzniklá v plyném prostředí byla velmi podobná vrstvě z procesu Sulfinuz, s výjimkou vrstvy sulfidů. Patent uváděl plynou atmosféru složenou z čpavku, uhlovodíků a dalších plynů obsahujících malé množství uhlíku.

Významný podíl na pochopení struktury vrstvy ocelí karbonitridovaných v plyné atmosféře měl český vědec Bohumil Přenosil, který publikoval své výsledky v roce 1965. Díky této studii mnoho společností vyvíjelo různé variace původního patentu a proces jako celek začal být akceptován konstruktéry, stejně jako metalurgy.

Pokrok v oblasti plyného prostředí nezabránil dalšímu rozvoji technologie solných lázní, nýbrž podnítil výrobce k vývoji ekologicky méně závadných a čistějších technologií. Jedním z nich byla i německá firma Degussa, která vyvinula metodu zvanou "Tufftride" a dvoufázový proces, který vytvářel nitridy a karbidy ve velmi mělké (přibližně 0.05 mm hluboké), ale zároveň velmi tvrdé vrstvě s dobrou

korozivzdorností, odolností proti opotřebení a zvýšenou odolností proti cyklickému namáhání. Délka trvání procesu byla velice krátká, kolem 1,5 hodiny, s následným kalením.

S příchodem technologie pulsní plasmy na počátku osmdesátých let minulého století, využívanou na iontovou nitridaci, nenechaly na sebe nové metody karbonitridace dlouho čekat. Tento proces byl záhy komerčně využit. Mezi výhody patří zrychlení procesu, menší nároky na čištění a přípravu, hlubší vrstva a lepší kontrola struktury povrchu. V současné době je vyvíjeno zařízení umožňující iontovou nitridaci a karbonitridaci v jedné komoře za využití jedné energie. Tato procedura nabízí lepší říditelnost a opakovatelnost celého procesu.

Ačkoliv plasmové karbonitridaci s největší pravděpodobností patří budoucnost, je to stále technologie příliš finančně nákladná. V současné době je nejrozšířenější karbonitridace v plynném prostředí.

2.2. Porovnání cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace

Vysoké požadavky na různé druhy ocelí a neželezných kovů mohou být často splněny jen speciálními procesy chemicko-tepelného zpracování. Mezi nejrozšířenější způsoby patří cementace, nitrocementace a karbonitridace. Při těchto procesech je zvyšována tvrdost povrchové vrstvy při zachování houževnatosti jádra.

2.2.1. Cementace

Cílem procesu cementace je nasycení povrchu uhlíkem. Nejčastěji jsou používány ocele s obsahem uhlíku 0,1 až 0,3 %. Požadovaný obsah uhlíku na povrchu je 0,8 až 1 %. Nauhličování probíhá v rozmezí teplot 850 až 950 °C, s následným kalením a popouštěním. Cementační vrstva je tvořena karbidy železa a ostatních legujících prvků a její hloubka se pohybuje mezi 0,5 až 2 mm. Výsledná tvrdost je cca 900 HV.

Uhlík vzniká stěpením oxidu uhelnatého dle rovnice:



Cementace může probíhat v prostředí tuhém, kapalném, plynném nebo za pomoci plasmy.

1. Tuhé prostředí

Oxid uhelnatý vzniká spalováním dřevěného uhlí o zrnitosti cca 5 mm, jako aktivátoru je nutno použít 7 až 20 % uhličitanu barnatého (boraxu).

Tato metoda se již téměř nepoužívá neboť zde není možná kontrola atmosféry, a proto tedy dochází k nerovnoměrnému nauhličení. Čas trvání je 10 až 15 hodin a proces je možno provádět v universální komorové peci.

2. Kapalně prostředí

Součásti jsou nauhličovány v lázni roztavených chloridových solí a kyanidů, konkrétně kyanatanu draselného (KCN) a kyanatanu sodného (NaCN). Proces je v porovnání s ostatními způsoby velmi rychlý a vzniklá vrstva velmi kvalitní. Nevýhodou byla vysoká jedovatost a problém s odpadovými kaly. Tyto nedostatky jsou v současnosti již vyřešeny.

3. Plynné prostředí

Proces probíhá v šachtové plynotěsné elektrické peci. Atmosféra vzniká krakováním kapalných uhlovodíků, konkrétně endoplynu. Kontrola atmosféry probíhá pomocí rosného bodu. Tenhle způsob je v současnosti bezkonkurenčně nejrozšířenější.

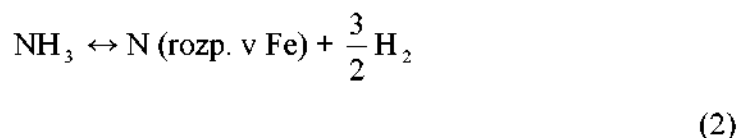
4. Iontová

Technologie cementace v plazmě je proces probíhající ve vakuu za asistence nízko ionizovaného plazmatu anomálního doutnavého výboje.

2.2.2. Nitridace

Proces nitridace je sycení povrchu oceli atomárním dusíkem, který zde vytváří nitridy železa Fe_4N a legujících prvků (chromu, vanadu, titanu, molybdenu a dalších). Probíhá za teplot 500 až 550⁰C a nemusí se následně kalit. Nitridované součásti zvětšují svůj původní rozměr, čímž vzniká tlakové pnutí, a tím pádem mají součásti zvýšenou únavovou pevnost. Z důvodu přítomnosti dusíku je výsledná vrstva tenčí (do 0,2 mm) s vysokou tvrdostí až 1200 HV.

Dusík vzniká disociací plynného čpavku dle rovnice:



Jako prostředí se používá tuhé, kapalně, plynné nebo pomocí plasmu.

2.2.3. Nitrocementace

Nitrocementace je proces sycení povrchu uhlíkem a dusíkem, přičemž zastoupení uhlíku je větší, za teplot nad A_{C3} , tedy mezi 820 a 840 °C. Po procesu následuje kalení a popouštění. Hloubka vrstvi je obvykle 0,3 až 0,4 mm a doba jeden až dvě hodiny. Používá se oceli s 0,2 až 0,4 % C. Výsledná struktura je složena z uhlíko-dusíkového martensitu, karbonitridů a zbytkového austenitu. Tvrdost se pohybuje mezi 700 až 800 HV. Proces je rychlejší z důvodu katalytického účinku dusíku. Jako prostředí je možno použít kapalně, plynné nebo pomocí plasmu.

2.2.4. Karbonitridace

Je rovněž proces sycení povrchu uhlíkem a dusíkem, ale je zde větší přítomnost dusíku. Teploty se pohybují pod A_1 , tedy kolem 550 °C. Výsledná vrstva je tvořena intermediální fází s karbonitridů o tloušťce 0,01 až 0,05 mm s tvrdostí okolo 1000 HV. Vrstva obsahuje okolo 8 % N, 2 % C a kolem 1 % O.

Karbonitridované součástky mají vysokou odolnost proti opotřebení, vynikající korozivzdornost a dobré frikční vlastnosti při nízkých zatíženích. Karbonitridace může probíhat v prostředí kapalném, plynném nebo pomocí plasmu.

2.2.5. Shrnutí základních parametrů procesů cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace

	Cementace	Nitridace	Nitrocementace	Karbonitridace
Sytící prvek	C	N	C,N	N,C
Teplota [°C]	850-950	500-550	820-840	550
Tloušťka vrstvy [mm]	0,5-2	do 0,2	0,3-0,4	0,01-0,05
Tvrdost vrstvy [HV]	900	1000-1200	700-800	1000

Tab. 1: Shrnutí základních parametrů procesů cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace

2.3. Metody karbonitridace

V současné době jsou používány tři druhy karbonitridace. Jsou to karbonitridace v kapalném prostředí, v plynném prostředí a plasmová.

2.3.1. Karbonitridace v kapalném prostředí

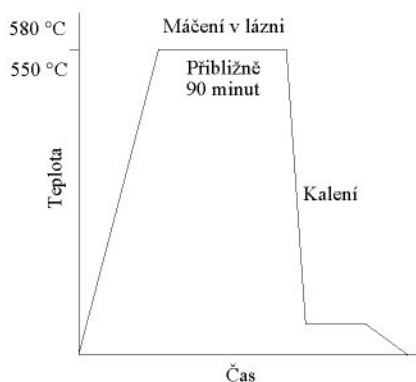
Proces je založen na máčení součástek v lázni roztavených chloridových solí a kyanidů. Karbonitridace v solné lázni je proti ostatním metodám na ústupu, nicméně je stále předmětem výzkumu mnoha firem, který je zaměřen především na otázky životního prostředí, zlepšení technologie a automatizace procesu a v neposlední řadě též rozšiřování možností využití zvyšováním a snižováním teploty procesu.

Tato technologie má své nesporné výhody, mezi něž patří zejména:

- Vysoce kvalitní součásti- vynikající korozivzdornost použitím oxidačního chlazení
 - pevnost
 - rychlost a jednoduchost procesu
 - jednotný karbonitridační efekt i na součástech s úzkými otvory
- Jednoduchost procesu- zjednodušené čištění součástek před zahájením procesu
 - jednoduchý monitoring procesu, kontrola pouze několika parametrů jako teplota, čas a složení lázně
- Vysoká flexibilita procesu- součásti vyžadující různou dobu lázně mohou být ve stejné vsázce
 - relativně krátké časy sycení
 - možnost využití různých chladicích médií jako voda, vzduch, dusík, vakuum atp.

Teplotní pásmo je velice důležité, neboť má zásadní vliv na difúzi a tím i na rychlost. Celý proces závisí na rozkladu kyanidu na kyanát, který je možno urychlit přítomností titanové provzdušňovací trubice. Tato trubice přivádí vzduch do roztavené lázně ode dna nádoby. Systém vyžaduje dobré operativní zabezpečení v podobě

pravidelného odsolování lázně, analýzy solí a periodické výměny. Teplota lázně se zvýší na 575 °C (1070 °F) a délka máčení vzroste na přibližně 2 hodiny. Účelem je precipitace všeho volného železa v solné lázni vznikajícího z košů a upínacích drátů užívaných pro ukládání součástek v lázni.

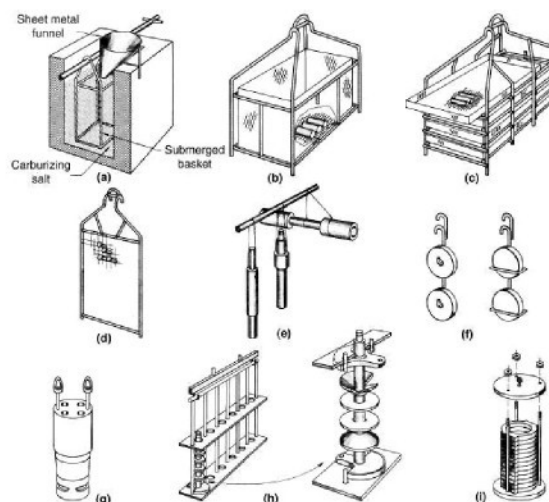


Obr. 2: Typický průběh karbonitridace v solné lázni



Obr. 3: Zařízení pro karbonitridaci v solné lázni firmy Houghton Durferrit, USA

Důležitým prvkem, zásadně ovlivňujícím výslednou vrstvu, je správný způsob vložení vsázky do lázně.



Obr. 4: Zařízení pro vkládání součástek do lázně

Vysvětlivky k obr. 6:

- (a) typický koš na malé součásti, vybavený nálevkou pro plnění koše součástmi bez stříkání
- (b) ,(c) koše pro menší součásti
- (d) síťovaný držák pro součásti s rozšířeným koncem
- (e) metoda na zavěšení malých součástí
- (f) háky z niklové slitiny pro rotační součásti
- (g) uchycení velkých součástí
- (h) stojan pro 6 malých klikových hřídelí
- (i) speciální stojan pro karbonitridaci vnějších průměrů

Proces karbonitridace v solné lázni je dnes již plně automatizován a řízen počítačem. V minulosti byl zásadní problém s pracovním prostředím nasyceným škodlivými látkami a s likvidací nebezpečných kyanidů. Nyní jsou tyto problémy již plně eliminovány a došlo k plnému souladu s právními předpisy. I v zemích s velice striktními zákony na ochranu životního prostředí, jako Německo nebo Švýcarsko, získalo několik firem certifikaci EMS podle ISO 14000.

2.3.2. Karbonitridace v plynné atmosféře

Tento proces představuje v současné době nejrozšířenější způsob karbonitridace. Podstata spočívá v sycení povrchu uhlíkem a dusíkem při teplotě okolo 580°C .

Atomární uhlík vzniká stěpením endo plynu a dusík pochází ze čpavku.

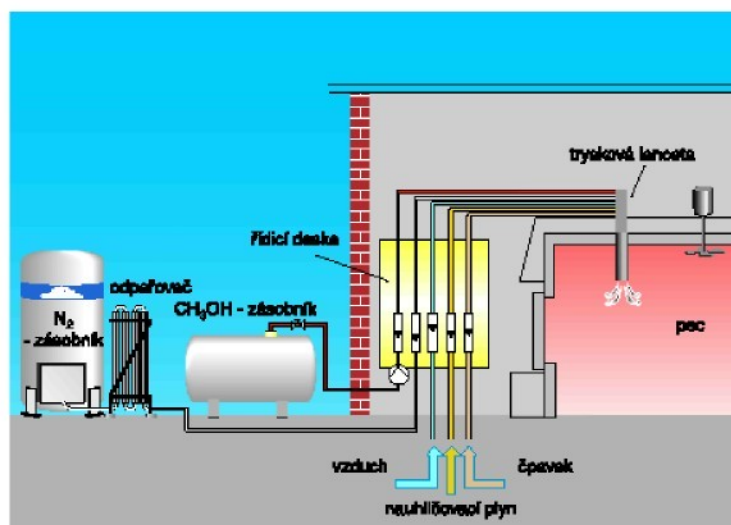
Ochranné atmosféry jsou vyráběny směřováním jednotlivých komponent a jejich chemickou reakcí přímo v pecích tepelného zpracování. Pro jejich regulovatelnost se nazývají "řízené atmosféry". Bylo vyvinuto velké množství metod a systémů zásobování, které jsou hospodárnější a provozně spolehlivější než vlastní výroba ochranných atmosfér a reakčních plynů ve vyvíječích. Důležitým faktorem pro správnost procesu karbonitridace je správná volba atmosféry, optimální nasazení těchto plynů a spolehlivé systémy zásobování až k peci.

Výhody řízených atmosfér:

- nízké provozní a investiční náklady
- vysoká produktivita
- spolehlivost a bezpečnost provozu
- minimální údržba
- jednoduchá obsluha
- flexibilita od 0 do 100 %
- reprodukovatelnost
- snadná regulace



Obr. 5: Karbonitridační pec firmy Service Heat Treating, USA



Obr. 6: Grafické znázornění procesu Carbotherm firmy Linde

2.3.3. Plasmová karbonitridace

Technologie karbonitridace v plazmě je proces probíhající ve vakuu za asistence nízko ionizovaného plazmatu anomálního doutnavého výboje. Elektrický stejnosměrný výboj umožňuje fyzikálním způsobem disociovat plynné prostředí za podmínek, kdy při klasickém zpracování v plynu by k aktivitě prostředí ještě nedošlo. Lze používat různé plyny (N_2 , Ar, H_2 , C_3H_8 ...) u nichž termické štěpení molekul během karbonitridace nepřichází vůbec v úvahu.

Hlavní výhody jsou:

- kratší časy procesu
- nezávadnost vůči životnímu prostředí
- až o 50% nižší spotřeba energií a plynů
- vysoká přesnost požadovaných parametrů
- proces probíhá bezoxidicky a bez vedlejších chemických reakcí

Na druhou stranu pro rovnoměrné nasycení musí být povrch dokonale odmaštěn, součást přesně vycentrována a v neposlední řadě má proces vysoké nároky na bezpečnost, přesnost výboje a poměrně vysoké počáteční náklady na pořízení zařízení.

Existuje celá řada teoretických prací, které vysvětlují fyzikálně-chemický průběh procesů na katodě. Když celá řada teorií se doplňuje nebo si odporuje, je zřejmé, že výsledné reakce jsou závislé na:

- parametrech elektrického výboje- energie iontů, hustota iontového proudu ...
- typu použitých plynů- disociační potenciál, chemická aktivita ...
- makro fyzikálních vlastnostech prostředí- teplota, tlak ...
- katodovém materiálu a stavu povrchu- emise elektronů ...

Atomy C a N jsou adsorbovány na povrchu, přecházejí do materiálu jinými mechanismy, než u jiných způsobů karbonitridace, a v okamžiku, kdy proniknou do mřížky Fe, je jejich chování ovlivněno pouze difúzními zákony.

Difúzní rovnice má tvar:

$$x = k \sqrt{D_0 \cdot e^{-\frac{Q}{RT}} \cdot t} \quad (3)$$

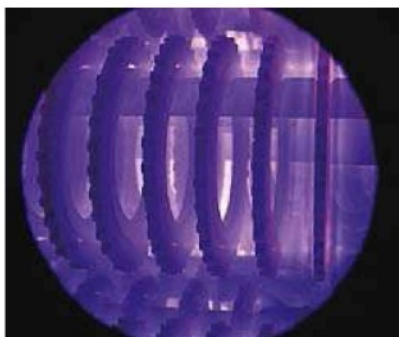
kde Q je aktivační energie difúze, D_0 koeficient difúze, který není závislý na teplotě a závisí pouze na struktuře mřížky a t čas procesu.

Teplota procesu je jeden z nejvýznamnějších parametrů. K jejímu dosažení je u klasických zařízení využíván pouze elektrický stejnosměrný výboj. Energetické ionty bombardují katodu a jejich kinetická energie se přeměňuje na energii tepelnou. Tento způsob zajišťuje sice všechny potřebné parametry procesu, ale nevýhodou je možná koncentrace výboje v místech se složitější geometrií nebo v dutinách. V těchto místech může dojít k přehřívání nebo dokonce i k natavení dílů.

Nevýhodou je rovněž i nutnost dokonalého vyčištění povrchu. Pokud není povrch čistý, doutnavý výboj je nestabilní a má snahu přecházet do režimu obloukového výboje. V první fázi procesu se proto pouze oddělují nečistoty od povrchu a tím pádem se doba procesu prodlužuje, v případě nepříznivého znečištění je nesnadné docílit ekonomického využití zařízení, a dokonce v extrémních případech nelze proces najet vůbec.

U zařízení nové generace je pouze část výkonu předávána z plazmatu, přibližně v poměru 30:70 %, zbývající tepelný výkon se předává z vnějšího ohřevu. Ten může být konvekční nebo radiační. Současně tedy může probíhat proces ohřevu a čištění výbojem, což výrazně zkracuje dobu trvání celého procesu. Dochází k výraznému „samočisticímu“ efektu a povrch se stává atomárně čistým, bez difúzních bariér. A neposlední řadě se též eliminují místa s vyšší hustotou iontového proudu.

U zařízeních starší generace nelze docílit lepší výsledek než $\pm 10^{\circ}\text{C}$, ale v mnoha případech je rozdíl teplot dokonce větší než 100°C . U zařízeních nejnovější generace lze teplotu regulovat $\pm 1^{\circ}\text{C}$ i u velice komplikovaných vsázek, a tyto hodnoty lze docílovat reprodukovatelně a trvale.



Obr. 7: Součásti procházející iontovou nitridací v peci



Obr. 8: Plasmová pec pro excentrické hřídele firmy Eltro, USA

2.3.4. Výsledné shrnutí metod karbonitridace

	Solná lázeň	Ochranná atmosféra	Plasma
Teplota [°C]	580	500-580	430 -580
Skladba vrstvy	uspokojivá	dobrá	velmi dobrá
Tloušťka vrstvy	uspokojivá	velmi dobrá	velmi dobrá
Tvrдость povrchu	uspokojivá	dobrá	velmi dobrá
Tvrдость jádra	uspokojivá	dobrá	velmi dobrá
Gradient tvrdosti	uspokojivý	dobry	velmi dobrý

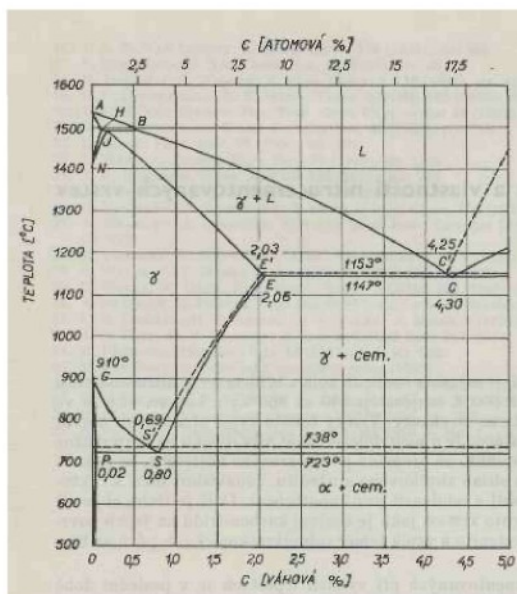
Tab. 2: Tabulka, porovnávající základní charakteristiky procesu karbonitridace v solné lázni, v ochranné atmosféře a pomocí plasm vypracovaná Dr. Thomasem ze společnosti Metaplas Ionon, SRN

Z tabulky vyplývá, že nejlepších parametrů karbonitridovaných součástek lze dosáhnout procesem karbonitridace v plasmě, kterého se stále častěji využívá i v oblastech s velmi vysokými nároky na přesnost a odolnost jako jsou například vozy Formule 1.

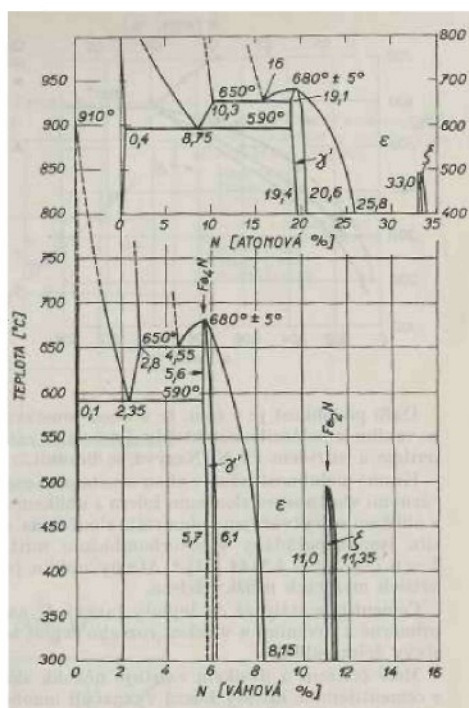
2.4. Rovnovážné soustavy Fe-C, Fe-N a Fe-C-N

Při studiu karbonitridace vycházíme ze znalosti rovnovážných diagramů soustav Fe-C, Fe-N a Fe-C-N. Uhlík i dusík patří mezi austenitotvorné prvky, které rozšiřují oblast stability austenitu, zvyšují teplotu překrystalizace vysokoteplotní modifikace feritu (δ -ferit) a snižují teplotu překrystalizace nízkoteplotní modifikace feritu (α -ferit). Intenzita vlivu dusíku na snížení překrystalizační teploty α -feritu je menší než intenzita vlivu uhlíku. Zatímco se v soustavě Fe-C vytváří jedna metastabilní sloučenina Fe_3C (cementit), v soustavě Fe-N existuje několik sloučenin – nitridů, které se ve srovnání s cementitem vyznačují mnohem vyšší metastabilitostí. Nejnižší obsah dusíku má nitrid γ' (Fe_4N), který existuje v okolí teploty A_1 (600°C) v rozmezí 5,3 až 5,75 % N. Nitrid γ' je stálý pouze do teploty 670°C a při této teplotě se přeměňuje na nitrid ϵ , který je stabilní i při nižších teplotách než 670°C . Má široké rozmezí složení, měnící se

s teplotou. Podle Paranjpeho a jeho spolupracovníků je rozmezí složení nitridu ϵ při teplotě $670\text{ }^{\circ}\text{C}$ 4,35 až 11,18 % N. Kromě těchto dvou nitridů existuje v soustavě Fe-N ještě nitrid o přibližném složení Fe_2N , existuje v rozmezí 11,07 až 11,18 % N, nemá však praktický význam.

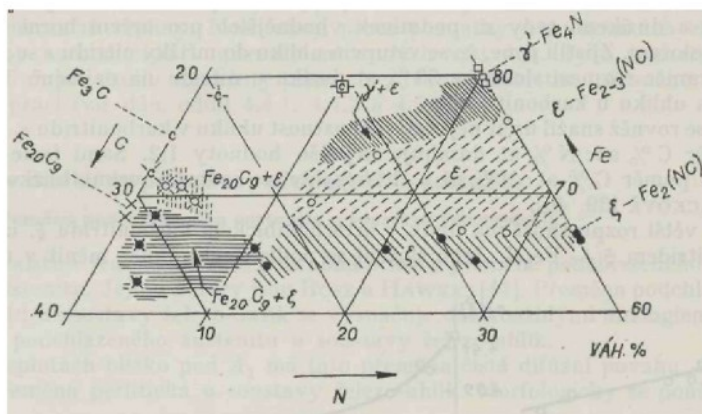


Obr. 9: Diagram rovnovážné soustavy Fe-C

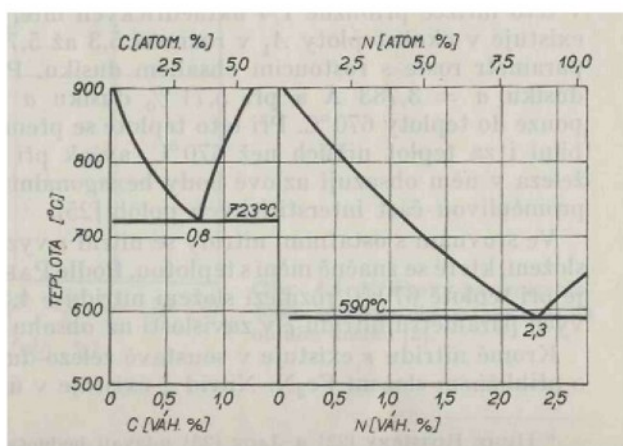


Obr. 10: Diagram rovnovážné soustavy Fe-N

Soustavu Fe-C-N studoval Jack, ale svou práci zaměřil pouze na jedinou teplotu 450 °C. Zjistil, že uhlík vstupuje do mřížky nitridů, kde nahrazuje atomy dusíku. Vznikají tak izomorfní karbonitridy s nitridy. Nejširší rozmezí složení má karbonitrid ε, který při teplotě 450 °C existuje v rozmezí 8,4 až 10,4 váhového součtu uhlíku a dusíku. Podle Přenosila se horní hranice složení karbonitridu ε v oblasti teplot 580 °C zvyšuje na 11,6 váhového součtu uhlíku a dusíku.



Obr. 11: Rovnovážný diagram ternární soustavy Fe - C - N pro T=450°C



Obr. 12: Porovnání oblastí s eutektoidní přeměnou u rovnovážných soustav Fe-C a Fe-N

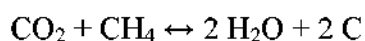
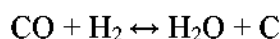
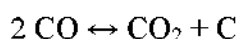
2.5. Fyzikální a chemické děje při karbonitridaci

Karbonitridace v technických atmosférách představuje velmi rozsáhlý soubor fyzikálních a chemických dějů, které je možno rozdělit podle současných představ do tří základních skupin:

1. Děje v karbonitridační atmosféře probíhající ve značné vzdálenosti od povrchu zpracovávaného materiálu - vzájemné reakce plynných složek a transport plynných složek v makro rozměrech.
2. Děje probíhající na fázovém rozhraní karbonitridační atmosféry a oceli nebo v jeho těsné blízkosti - přestup uhlíku a dusíku.
3. Transportní děje v oceli - difúze uhlíku a dusíku v austenitu

2.5.1. Sycení uhlíkem

Při nauhličování v plynné atmosféře se jako zdroj uhlíku používá CO nebo CH₄. Samotný děj lze popsat následujícími reakcemi:



(4), (5), (6)

Uvedené reakce jsou vratné a jejich průběh může být doprovázen také odčerpáváním uhlíku z povrchu oceli – oduhličováním.

Dílní soustava kysličník uhelnatý – kysličník uhličitý (CO-CO₂)

Uhlík je vždy obsažen v plynné fázi v atomární formě a vyvozuje tedy určitý parciální tlak, který závisí na parciálním tlaku kysličníku uhelnatého a kysličníku uhličitého.

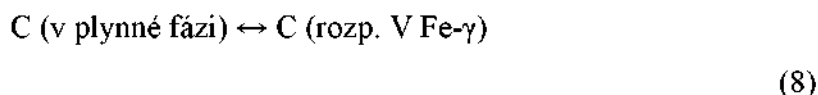
Jejich vzájemná rovnováha je podle termodynamického zákona určena vztahem:

$$K_i = \frac{P_{\text{CO}_2} \cdot P_{\text{C}}}{P_{\text{CO}}^2}$$

(7)

Parciální tlak uhlíku je mírou nauhličovací schopnosti atmosféry.

Přechod uhlíku z atmosféry do tuhého roztoku v austenitu lze vyjádřit rovnicí:



O tom, zda nastane nauhličování nebo oduhličování, rozhoduje parciální tlak uhlíku v plynné fázi, který je v rovnováze se složkami atmosféry, a parciální tlak uhlíku v rovnováze s tuhým roztokem v austenitu.

Nauhličování probíhá pouze tehdy, je-li spojeno s úbytkem volné entalpie soustavy:

$$\Delta G = -RT \ln \frac{p_C}{p'_C} \quad (9)$$

kde R je plynová konstanta, T je teplota v Kelvinech, p_C je parciální tlak uhlíku v plynné fázi [Pa] a p'_C je parciální tlak uhlíku v rovnováze s tuhým roztokem [Pa].

Kvalitativně platí, že se ocel nauhličuje, jestliže parciální tlak uhlíku v plynné fázi je větší než parciální tlak uhlíku, který je v rovnováze s tuhým roztokem v austenitu. K oduhličování dochází za podmínek přesně opačných. Rovnováha je dána rovností tlaků, kdy výraz $\ln \frac{p_C}{p'_C}$ je rovný nule.

Hodnoty p_C a p'_C jsou velmi malé a běžnými metodami nejdou změřit. Hodnoty lze nahradit termodynamickými aktivitami a_C a a'_C , které jsou přímo úměrné hodnotám tlaků. Termodynamické aktivity vztahujeme k vhodnému standardnímu stavu. U uhlíku jako standardní stav volíme grafit. Aktivita uhlíku je pak dána vztahem:

$$a_C = \frac{p_C}{p_{C1}} \quad (10)$$

kde p_C je tlak uhlíku ve zkoumaném stavu a p_{C1} je tlak uhlíku nestandardním stavu.

Aktivitu standardního stavu volíme vždy rovnou 1. Dosazením do vztahu /1/ získáme

$$K_I = \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}^2} a_C \quad (11)$$

a z něj:

$$a_c = K_1 \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} \quad (12)$$

Zavedením aktivity získáme vztah pro změnu volné entalpie ve tvaru:

$$\Delta G = -RT \ln \frac{a_c}{a'_c} \quad (13)$$

Dosazením aktivity získáme vztah pro změnu volné entalpie ve tvaru:

$$\Delta G = -RT \ln \frac{K_1 \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}}}{a'_c} \quad (14)$$

Podmínka rovnováhy je $G = 0$, a tedy:

$$a_c = a'_c = K_1 \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} \quad (15)$$

Vztah mezi aktivitou a koncentrací uhlíku v tuhém roztoku v austenitu vyjadřujeme pomocí koeficientu aktivity. Koncentraci uhlíku označujeme c_c a koeficient aktivity uhlíku γ_c , platí:

$$a_c = \gamma_c \cdot c_c \quad (16)$$

Dosazením do tohoto vztahu dostaneme

$$c_c = \frac{1}{\gamma_c} \cdot K_1 \cdot \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} \quad (17)$$

Z rovnice můžeme přesně určit, s jakým obsahem uhlíku v austenitu je atmosféra v rovnováze. Obsah uhlíku v austenitu v rovnováze s atmosférou se označuje jako potenciál uhlíku atmosféry, nebo nauhličovací potenciál atmosféry.

Číselně lze teplotní závislost rovnovážné konstanty reakce vyjádřit podle Wagmana:

$$\log K_I = \log \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}^2} = \frac{8870}{T} - 9,060 \quad (18)$$

Dílčí soustava metan-vodík (CH_4 - H_2)

Rovnováha nauhličovací reakce $CH_4 \leftrightarrow 2 H_2 + C$ je podle zákona o termodynamické rovnováze popsána rovnicí

$$K_{II} = \frac{p_{H_2}^2 \cdot p_C}{p_{CH_4}} \quad (19)$$

Přechod uhlíku z atmosféry do tuhého roztoku v austenitu se může opět uskutečnit jen tehdy, je-li spojen s úbytkem volné entalpie.

$$\Delta G = -RT \ln \frac{a_C}{a_C} = -RT \ln \frac{K_{II} \cdot \frac{p_{CH_4}}{p_{H_2}^2}}{a_C} \quad (20)$$

Rovnováha mezi atmosférou a uhlíkem v tuhém roztoku nastane, je-li $\Delta G = 0$, tzn. je-li aktivita uhlíku v tuhém roztoku v austenitu a aktivita uhlíku vyvinutá složkami atmosféry navzájem stejná.

Číselně lze teplotní závislost rovnovážné konstanty reakce vyjádřit podle Wagmana:

$$\log K_{II} = \log \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}} = -\frac{46500}{T} + 5,770 \quad (21)$$

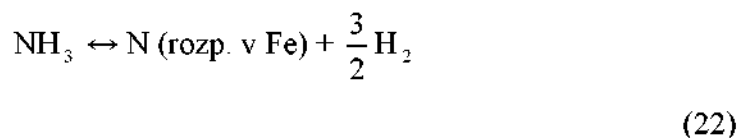
Popis ostatních soustav z hlediska termodynamiky je stejný.

2.5.2. Sycení dusíkem

Zdrojem dusíku při karbonitridaci je amoniak NH_3 . Dusík je přítomen v tuhém roztoku ve feritu v atomárním stavu, v molekulárním stavu nemůže vstoupit do mřížky kovu a není tedy schopný difúze do jádra kovu. Při průchodu karbonitridační atmosféry peci probíhá rozklad amoniaku jak v plynné fázi, tak i na povrchu karbonitridovaných součástí. V plynné fázi dochází k rozkladu amoniaku v důsledku srážky molekul, kdy se uvolní větší množství energie než je aktivační energie disociace. Takto vzniklý atomární dusík se však velmi rychle opět slučuje v molekulární dusík, který není schopen difúze. Je tedy zřejmé, že s rostoucí teplotou roste počet srážek a tím i disociace amoniaku.

Při styku amoniaku s povrchem pevné fáze dochází působením přitažlivých sil krystalové mřížky k adsorpci plynných molekul. Tyto molekuly se dostanou do těsné blízkosti povrchu kovu. Dojde-li k disociaci takto adsorbované molekuly amoniaku, může vznikající atomární dusík difundovat do mřížky kovu.

Rozklad amoniaku a vstup dusíku z atmosféry do tuhého roztoku můžeme popsat reakcí :



Pro tuto reakci platí vztah:

$$K_{VII} = \frac{p_{\text{H}_2}^{\frac{3}{2}} \cdot a_{\text{N}}}{p_{\text{NH}_3}} \quad (23)$$

kde K je rovnovážná konstanta, a_{N} je aktivita dusíku v tuhém roztoku a p_{H_2} a p_{NH_3} jsou parciální tlaky vodíku a nerozloženého amoniaku v atmosféře.

Sycení železa dusíkem lze rovněž popsat vztahy:



Z rovnice lze podle zákona o termodynamické rovnováze napsat vztah:

$$K_{VII} = \frac{p_{N_2}^{\frac{1}{2}} \cdot p_{H_2}^{\frac{3}{2}}}{p_{NH_3}} \quad (27)$$

Změna volné entalpie při sycení oceli dusíkem je závislá na parciálním tlaku dusíku atomárního v rovnováze s tuhým roztokem p'_N a na parciálním tlaku atomárního dusíku v plynné fázi p_N :

$$\Delta G = -RT \ln \frac{p_N}{p'_N} \quad (28)$$

Jestliže je dosaženo rovnováhy, platí rovnost:

$$p_N = p'_N \quad (29)$$

Míru schopnosti atmosféry nasycovat povrch železa dusíkem udává vztah:

$$a_N = \frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{\frac{3}{2}}} \cdot K_{VII} \quad (30)$$

Protože rovnovážná konstanta je pouze funkcí teploty lze nitridační účinek atmosféry při izotermických podmínkách posuzovat podle výrazu:

$$\frac{p_{NH_3}}{p_{H_2}^{\frac{3}{2}}} = K_n \quad (31)$$

kde K_n je tzv. nitridační číslo, které popisuje nitridační schopnost atmosféry.

Z tohoto vztahu vyplývá, že současným snižováním p_{NH_3} a p_{H_2} v atmosféře, při stejném poměru těchto parciálních tlaků, dojde ke vzrůstu nitridačního účinku, tedy např. při snížení celkového tlaku atmosféry nebo při ředění inertním plynem. Nitridační číslo se zvyšuje zejména se zvyšujícím se parciálním tlakem nerozloženého čpavku. Vzrůst nitridačního potenciálu lze dosáhnout i snížením parciálního tlaku vodíku v karbonitridační atmosféře, např. přidáním kyslíku: $2 H_2 + O_2 = 2 H_2 O$, nebo

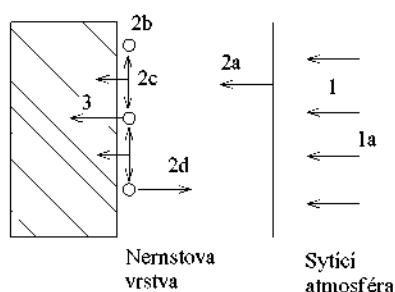
zředěním atmosféry inertním plynem, tedy i např. dusíkem. Tyto účinky lze spojit, přidáme-li do atmosféry vzduch.

Disociace molekul na povrch oceli, a s tím spojená schopnost sytit dusíkem, se při stálé teplotě zvětšuje s rostoucí koncentrací amoniaku v adsorpční vrstvičce. Schopnost sytit dusíkem tedy vzrůstá s obsahem nerozloženého amoniaku v karbonitridační atmosféře.

2.5.3. Děje probíhající na fázovém rozhraní karbonitridační atmosféry a oceli

Na přestupu uhlíku a dusíku do oceli fázovým rozhraním se analogicky k heterogenním reakcím podílejí následující kroky:

1. Difúze molekul nauhličujících složek atmosféry nebo složek dusíkem plynou hraniční Nernstovu vrstvu k povrchu oceli
2. Adsorpce reagujících látek na povrchu oceli
3. Soubor chemických reakcí na povrchu oceli
4. Desorpce molekul plyných reakčních produktů
5. Difúze plyných reakčních produktů hraniční Nernstovou vrstvou zpět do atmosféry



Obr. 17: Schématické znázornění dějů na fázovém rozhraní syticí atmosféry a oceli

Vysvětlivky k obrázku č. 13:

- 1 - transport plyných syticích látek k oceli
- 1a - vzájemná reakce plyných složek
- 2a - difúze syticí látky hraniční Nernstovou vrstvou
- 2b - adsorpce reagujících látek na povrchu oceli
- 2c - soubor chemických reakcí na povrchu oceli
- 2d - desorpce reakčních produktů a jejich transport od povrchu oceli do atmosféry Nernstovou vrstvou
- 3 - difúze uhlíku do jádra materiálu

Atomy uhlíku a dusíku, které přestoupily fázovým rozhraním z plynné fáze do oceli, difundují v austenitu směrem do jádra cementovaného materiálu.

Vliv všech zmíněných dílčích kroků může být za rozdílných podmínek obecně různě významný. Dominantní je však u dílčích dějů řazených za sebou vždy úloha nejpomalejšího procesu, který určuje rychlost přestupu látky, kterou je ocel sycena.

Při karbonitridaci jsou nejčastěji rozlišovány modely reakční a difúzní. Model reakční charakterizuje předpoklad, že nauhličování nebo sycení dusíkem je kineticky kontrolováno souborem reakcí na fázovém rozhraní atmosféry a oceli nebo v jeho těsné blízkosti.

Při modelu difúzním platí předpoklad, že kineticky rozhodujícím krokem je difúze uhlíku, respektive dusíku v austenitu směrem do jádra oceli nebo eventuálně difúze nauhličujících látek a látek sytících dusíkem v plynné atmosféře směrem k povrchu oceli.

V průběhu procesu platí vztah:

$$J_{X,D} = J_{X,R} \quad (32)$$

kde $J_{X,D}$ je difúzní tok látky x do vrstvy a $J_{X,R}$ je difúzní tok látky x do vrstvy v důsledku přestupových dějů.

Pro reakční model vyjadřuje skutečnost, že difúze může odvést pouze tolik uhlíku nebo dusíku do jádra, kolik ho dávají k dispozici nauhličovací reakce nebo reakce sytící dusíkem.

Pro model difúzní platí, že fázovým rozhraním může přestoupit pouze tolik uhlíku nebo dusíku, kolik je ho schopna odvést difúze směrem do jádra.

Na počátku jsou kineticky rozhodující přestupové děje na povrchu oceli, protože vzhledem k vysokému gradientu aktivity uhlíku a dusíku v austenitu je difúze schopna odvést větší množství uhlíku, respektive dusíku, směrem od povrchu oceli do jádra, než je k dispozici v důsledku povrchových reakcí.

Při déle trvající karbonitridaci roste hloubka vrstvy, čímž se zároveň snižuje gradient aktivity uhlíku nebo dusíku ve vrstvě. V důsledku poklesu gradientu aktivity klesá difúzní tok a difúze se stává kineticky rozhodujícím dějem procesu.

Difúze plyných složek karbonitridačních atmosfér hraniční Nernstovou vrstvou

Povrch oceli obklopuje tenká plynná vrstva tzv. Nernstova vrstva, v níž existují částečně odlišné fyzikální a chemické podmínky, než jsou v atmosféře, která je od povrchu zpracovávaného materiálu dostatečně vzdálena.

V Nernstově vrstvě probíhají tyto procesy:

1. Difúze nauhličujících látek a látek sytících dusíkem směrem k povrchu oceli
2. Jejich adsorpce na povrchu
3. Desorpce reakčních produktů
4. Jejich zpětná difúze do atmosféry
5. Případná reakce produktů s ostatními komponenty plynné fáze

Nauhličující složky atmosféry CO a CH₄ a složka sytící dusíkem NH₃ jsou odčerpávány reakcemi na povrchu oceli opět doplňovány konvekci nebo difúzí z atmosféry. Koncentrace těchto složek směrem k povrchu klesá a naopak koncentrace reakčních produktů směrem k povrchu stoupá.

2.5.4. Difúze uhlíku a dusíku v austenitu

Uhlík i dusík tvoří ve feritu interstitický tuhý roztok. Jeho vznik závisí na poloměru rozpuštěných atomů, který nesmí být o mnoho větší než volná místa mezi těsně uspořádanými atomy v mřížce základního kovu.

Podle Häggova kritéria vzniká v těsně uspořádané mřížce s koordinačním číslem 8 nebo 12 interstitický tuhý roztok tehdy, jestliže účinný poloměr atomů rozpuštěného prvku není větší než 0,59 % účinného poloměru atomů základního kovu. Účinný poloměr atomů železa je 12,8 nm, atomů uhlíku 7,7 nm a atomů dusíku 7,1 nm. Obsah dusíku v tuhém roztoku ve feritu má význam pro mechanické vlastnosti karbonitridované vrstvy.

Vztahy pro difúzi navrhl Fick na základě analogie s Fourierovými rovnicemi pro vedení tepla.

První Fickova rovnice vyjadřuje předpoklad, že váhové množství m difundující látky, které prochází za jednotku času jednotkovou plochou, je úměrné gradientu koncentrace $\delta c/\delta x$. Koeficient úměrnosti D , o rozměru m^2/s , se nazývá koeficient

difúze. Záporné znaménko značí, že směr přenosu hmoty při difúzi je opačný než smysl gradientu koncentrace:

$$m = -D \frac{\delta c}{\delta x} \quad (33)$$

Z tohoto vztahu vyplývá rovnice, vyjadřující vztah mezi rychlostí změny koncentrace $\delta c/\delta t$ v místě, kde je v uvažovaném okamžiku koncentrační gradient:

$$\frac{\delta c}{\delta t} = \frac{\delta}{\delta x} D \left(\frac{\delta c}{\delta x} \right) \quad (34)$$

Tento vztah platí pro obecný případ, kdy hodnota D může být závislá na koncentraci, což je případ nastávající ve všech karbonitridačních vrstvách.

Koeficient difúze uhlíku je závislý na koncentraci a jeho hodnota roste s koncentrací uhlíku. Difúzní rovnice v karbonitridovaných vrstvách jsou rovněž komplikovány výskytem nitridických a karbonitridických fází.

Také rychlost difúze dusíku závisí na koncentraci. Výpočet difúzních pochodů ve vícefázové soustavě při karbonitridaci je natolik komplikovaný, že výpočty průběhů C a N nebývají prováděny, ale jsou stanovovány experimentálně.

Důležitým faktorem je zejména teplotní závislost koeficientu difúze D , kterou vyjadřuje Arrheniův vztah:

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (35)$$

kde D_0 je konstanta a E_a je aktivační energie.

Teplota má proto zásadní vliv na rychlost pohybu C a N v materiálu a tím i na rychlost růstu vrstvy a koncentraci C a N ve vrstvě.

2.6. Kinetika růstu vrstvy ϵ karbonitridu

Tvorba vrstvy karbonitridu ϵ je výsledkem dvou proti sobě působících difúzních dějů:

1. Jednoduchý difúzní růst samotné vrstvy karbonitridu

Nejprve dochází k přestupu uhlíku a dusíku do vrstvy, následuje růst jejich koncentrace, nukleace, růst částic karbonitridu a růst tloušťky jeho vrstvy.

2. Únik uhlíku a dusíku z vnitřního rozhraní této vrstvy do oblastí uhlíko-dusíkového austenitu a pohyb dusíku z austenitu difúzí do feriticko-perlitických oblastí základního materiálu.

Jak vyplývá z dřívějších studií, při teplotě 620 °C vyhovuje kinetika růstu vrstvy ϵ karbonitridu přibližně lineární závislosti její tloušťky na čase, i když většina difúzních vrstev roste úměrně s $t^{\frac{1}{2}}$.

Na kinetiku růstu vrstvy ϵ karbonitridu má rozhodující vliv složení karbonitridační atmosféry. Pro vznik karbonitridu je potřebný dostatečný nauhličující i nitridační potenciál, zaručující dostatečný přestup C a N do oceli a jejich gradient, umožňující vznik difúze směrem do jádra.

U materiálů s dostatečným množstvím uhlíku v základní hmotě se vytvoří vrstva karbonitridu ϵ i tehdy, jestliže atmosféra nemá nauhličovací schopnost. Uhlík se do karbonitridů dostává z jádra vlastního materiálu.

2.7. Vliv atmosféry na kinetiku růstu vrstvy ϵ karbonitridu

1. Atmosféra NH_3

Tato fáze nezaručuje příznivou kinetiku růstu vrstvy. Vyznačuje se tím, že v úzkém rozmezí nitridačního potenciálu se prudce zhoršuje rychlost růstu vrstvy fáze ϵ . Příčinou je nepochybně nedostatek uhlíku ve vrstvě.

2. Atmosféra NH_3 se 40 % propanu

Ani tato atmosféra není příliš vhodná, protože má příliš vysokou nauhličovací schopnost. S tím souvisí i vysoká aktivita uhlíku ve fázi ϵ , čímž se vytváří horší podmínky pro difúzi dusíku.

3. Atmosféra NH_3 s 25 až 30 % propanu

Tato atmosféra dává větší tloušťku vrstvy při vysokých nitridačních schopnostech (nízká disociace), ale v úzkém rozmezí disociace dochází k náhlému poklesu tloušťky vrstvy.

4. Atmosféra NH_3 s 5 až 12,5 % propanu

Tato atmosféra se jeví jako nejvhodnější, vznikají velmi kvalitní vrstvy.

5. Atmosféra NH_3 s přísadou vzduchu

Přísada vzduchu v karbonitridační atmosféře zvyšuje nitridační potenciál tím, že vzdušný kyslík reaguje s vodíkem za vzniku vodní páry a tak ho váže. Nasycení karbonitridu ϵ kyslíkem zlepšuje podmínky pro difúzi dusíku v této fázi a zlepšuje tak kinetiku jejího růstu.

Příznivý vliv na rychlost růstu karbonitridu ϵ má také přítomnost vodní páry v nitridační atmosféře.

[5]

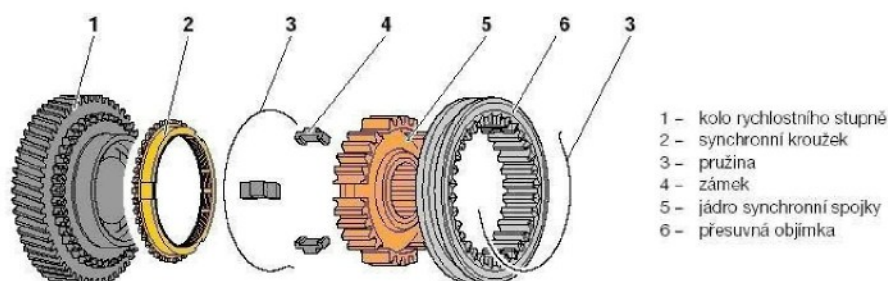
3. Experimentální část

3.1. Popis zkoumaných vzorků

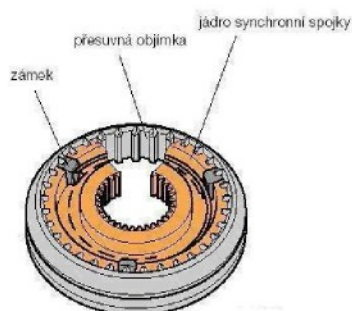
Předmětem zkoumání byla karbonitridovaná součást převodovky řady MQ 200 firmy Škoda-Auto. MQ 200/02T je mimořádně lehká převodovka se dvěma hřídeli využívaná nejen ve vozech Škoda Fabia, ale také v dalších vozech koncernu Volkswagen od třídy A00 až po třídu A. Skříň je vyrobena z hořčíkové slitiny. Tato převodovka může přenášet kroutící momenty až do 200 Nm. Pro porovnání jsem si vybral nitrocementovaný vzorek, rovněž součást převodovky MQ 200.

Karbonitridovaný vzorek

Pro sledování karbonitridace bylo použito jádro synchronní spojky (*Obr. 14*) o vnějším průměru 72 mm, jež je pevně nasazeno na hnaném hřídeli. V jádru synchronní spojky jsou vybrány pro zámky, které jsou pomocí dvou pružin tlačeny směrem od středu. Výchozí materiál pro chemicko-tepelné zpracování je konstrukční ocel ČSN 14 220 s obsahem uhlíku 0,15% a nízkolegovaná 1,1 % manganu a 0,9 % chromu.



Obr. 15: Konstrukce zámkové synchronizace - jednotlivé části



Obr. 16: Zámková synchronizace po kompletaci

Nitrocementovaný vzorek

Jedná se o ozubené kolo se šikmými zuby (Obr. 17) z hnacího hřídele. Vnější průměr je 63 milimetrů. Na kole se nachází vnitřní drážkování.

3.2. Popis procesů karbonitridace a nitrocementace ve firmě Škoda-Auto

Popis procesu karbonitridace

Proces karbonitridace probíhá v kalírně ve vsázkové peci číslo devět od firmy Ipsen Industries International. Jedná se o klasickou poloautomatickou víceúčelovou karbonitridační pec s ochrannou ENDO atmosférou a řízeným ochlazováním.

Požadovaná výsledná hloubka vrstvy je 8-24 mikrometrů.

Ochranná atmosféra je dodávána ze zásobníků přes řídicí desku v množstvích 5 Nm³/hod Endo atmosféra a 5 Nm³/hod čpavku. Teplota procesu je 580°C s délkou trvání 2 hodiny a 15 minut s následným zamočením do oleje o teplotě 90°C.

Teplota [°C]	Čas [min]	Hloubka vrstvy [μm]	Atmosféra
580	135	8-24	50 % Endo atmosféra 50 % Čpavek

Tab. 3: Tabulka základních parametrů procesu karbonitridace ve firmě Škoda-Auto

Popis procesu nitrocementace

Proces nitrocementace probíhá v průběžné peci. Požadovaná výsledná hloubka vrstvy je 0,3 až 0,5 milimetrů.

	Teplota [°C]	Čas [min]	Atmosféra	Průtok [Nm ³ /hod]
Zóna 1	900	56	98,6 % Endo atmosféra 1,4 % Čpavek	Endo atmosféra - 14 Čpavek - 0,2
Zóna 2	900	84	98,4 % Endo atmosféra 1,6 % Čpavek	Endo atmosféra - 12 Čpavek - 0,2
Zóna 3	830	42	100 % Endo atmosféra	Endo atmosféra - 22
Kalení do oleje MAR TEMP 890 o teplotě 120°C. Doba kalení je 300 sekund při otáčkách 750 za minutu.				
Popouštění za teploty v rozmezí 150 až 180°C po dobu 126 minut.				

Tab. 4: Tabulka základních parametrů procesu nitrocementace ve firmě Škoda-Auto

3.3. Experimentální metodika

3.3.1. Metalografická analýza

Vzorky byly nejdříve nařezány na přístroji Buehler- Delta abrasimet cutter (*Obr. 18*) a následně zalisovány do žluté metakrylátové lici pryskyřice dentacryl od firmy Spofa dental - Praha na přístroji Buehler- Simplimet 2 Mounting press (*Obr. 19*). Metalografický výbrus byl prováděn pomocí brusných kotoučů (*Obr. 20*) na brusných papírech s klesající velikostí zrna 80-120-280-400-600-1200-2000 a následně vyleštěny diamantovou pastou d2. Jako leptadlo byl použit 2% nital. Hodnocení strukturní analýzy bylo provedeno na optickém mikroskopu Neophot 32 od firmy Carl Zeiss Jena (*Obr. 21*). Z každého vzorku bylo měřeno jak vnější ozubení, tak i vnitřní drážkování.

3.3.2. Měření tvrdosti a mikrotvrdosti

Tvrdost byla měřena pomocí tvrdoměru Zwick 3212 (*Obr. 22*) při zatížení 0,2 kilogramu. Vzhledem k profilu vzorků a možnostem tvrdoměru byla povrchová tvrdost měřena na bocích vzorků.

Mikrotvrdost byla měřena na moderním mikrotvrdoměru Buehler Micrometr 21011 (*Obr. 23*).

3.3.3. Mikroanalýza chemického složení

Rozbor chemického složení byl proveden moderním spektrometrem s doutnavým výbojem Spectruma GDA 150 od firmy Spectruma-Analytik GmbH (Obr. 24).

Přístroj umožňuje přesnou analýzu chemického složení a stanovení tloušťek vrstev na technickém povrchu. Kvalitně mohou být stanoveny všechny prvky všechny prvky, včetně těch nejllehčích, jako vodík, kyslík, dusík a uhlík. Limity detekce se pohybují okolo 0,01%.

Hloubková rozlišovací schopnost činí 0,05 μm .

Nově konstruovaný zdroj pro doutnavý výboj používá vzduchem chlazenou katodu. Průměr anody činí 2,5 mm.

Přístroj je vybaven optickým CCD systémem s vlastní automatickou kalibrací. Rozsah vlnových délek činí 160-500 nm. Výsledky měření jsou zpracovávány na externím počítači.

3.4. Výsledky a diskuze

3.4.1. Karbonitridovaný vzorek

Výsledky metalografické analýzy

Bylo pořízeno 5 fotek (čísla obrázků 25, 26, 27, 28, 29) metalografických výbrusů. Pata zubu, čelo zubu a vnitřní drážkování ve zvětšení 200 krát. Čelo zubu a vnitřní drážkování v rozlišení 500 krát.

Tloušťka povrchové vrstvy karbonitridů

Položka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Délka [μm]	15,21	14,81	16,43	16,23	11,76	7,71	10,75	8,32	8,11	7,71

Tab. 5: Tloušťka povrchové vrstvy karbonitridů - vnější ozubení

Střední hodnota [μm]	11,7
Střední směrodatná odchylka [μm]	3,49

Položka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Délka [μm]	10,65	8,31	12,97	15,12	9,48	8,84	9,56	7,62	11,87	14,10

Tab. 6: Tloušťka povrchové vrstvy karbonitridů – vnitřní drážkování

Střední hodnota [μm]	10,85
Střední směrodatná odchylka [μm]	2,43

Výsledky měření tvrdosti

Položka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 0,2	945,2	912,0	974,5	958,3	890,6	901,5	923,4	940,2	915,3	964,3

Tab. 7: Karbonitridovaný vzorek - povrchová tvrdost HV 0,2 na boku vzorku

Střední hodnota HV 0,2	932,53
Střední směrodatná odchylka HV 0,2	26,79

Výsledky měření mikrotvrdosti

Metoda:	Vickers	Zatížení:	HV 0.01
Objektiv:	40x	Doba zatížení:	12.000

	HV 0.01	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	1021.0	4.1	4.5	4.3
2	1017.7	4.1	4.5	4.3
3	1016.2	4.5	4.1	4.3
4	930.3	4.5	4.5	4.5
5	1071.3	4.1	4.3	4.2

Tab. 8: Tvrdost karbonitridované bílé vrstvičky vzorku

Minimum:	930.3	Maximum:	1071.3	StDev:	50.786
Průměr:	1011.3	Medián:	1017.7		

Gradient tvrdosti jádra- Vnější ozubení

Metoda:	Vickers	Zatížení:	HV 0.1
Objektiv:	40x	Doba zatížení:	12.000

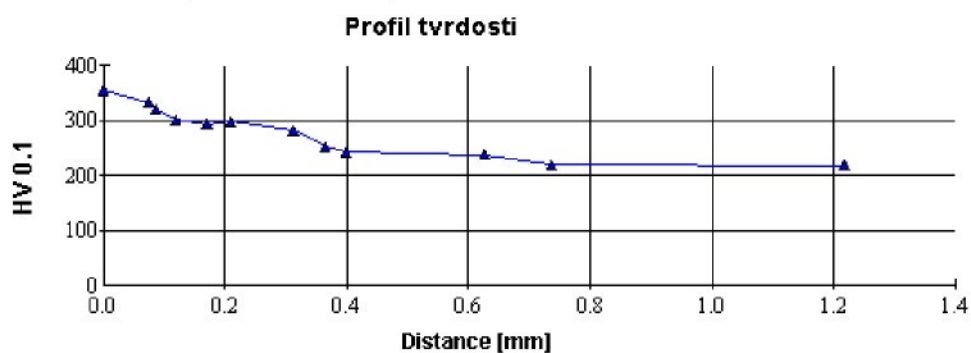
	Dist[μm]	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	0.4	355.4	23.0	22.7	22.8
2	74.1	333.8	23.6	23.6	23.6
3	85.5	320.2	24.2	24.0	24.1
4	118.0	301.5	24.2	25.4	24.8
5	169.7	294.3	25.2	25.0	25.1
6	208.5	299.4	24.4	25.4	24.9
7	311.7	282.9	26.6	24.6	25.6
8	364.3	252.1	27.2	27.0	27.1
9	398.3	243.1	27.6	27.6	27.6
10	626.5	237.9	27.4	28.4	27.9
11	735.6	219.9	28.6	29.4	29.0
12	1216.8	218.4	28.6	29.6	29.1

Tab. 9: Gradient tvrdosti jádra - vnější ozubení

Minimum:	218.4	Maximum:	355.4	StDev:	45.281
Průměr:	279.9	Medián:	288.6		

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost	ECD [μm]
320	85.8
270	333.7
220	734.9



Graf 1: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti

Vnitřní drážkování

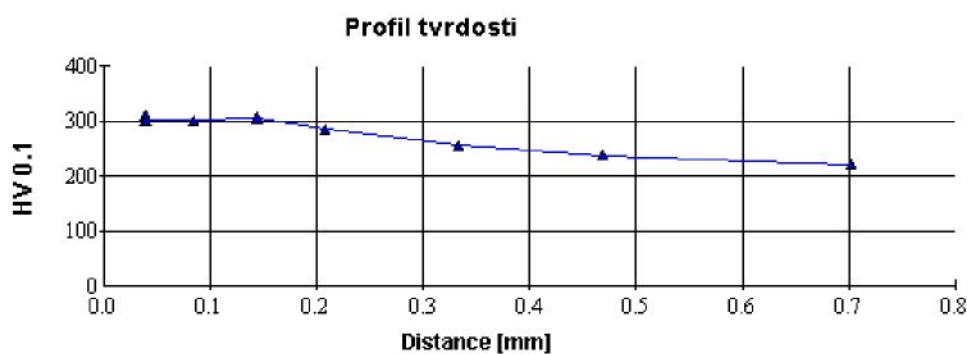
	Dist[μm]	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	39.4	310.0	23.9	25.0	24.5
2	39.4	302.3	24.2	25.4	24.8
3	84.6	302.5	25.0	24.5	24.8
4	144.2	306.2	24.6	24.6	24.6
5	207.8	285.3	25.8	25.2	25.5
6	332.8	256.2	26.8	27.0	26.9
7	468.4	237.8	27.4	28.4	27.9
8	701.8	221.5	28.6	29.3	28.9

Tab. 10: Gradient tvrdosti jádra – vnitřní drážkování

Minimum:	221.5	Maximum:	310.0	StDev:	34.527
Průměr:	277.7	Medián:	293.8		

Efektivní hloubka prokalení:

Mezní tvrdost	ECD [μm]
270	273.5



Graf 2: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti

3.4.2. Nitrocementovaný vzorek

Výsledky metalografické analýzy

Byly pořízeny 4 fotky (čísla obrázků 30, 31) metalografických výbrusů vnějšího ozubení ve zvětšeních 200 a 500 krát.

Výsledky měření tvrdosti

Položka	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
HV 0,2	816,6	818,7	856,8	843,4	789,6	858,4	810,6	862,6	863,4	815,8

Tab.11: Nitrocementovaný vzorek - povrchová tvrdost HV 0,2 na boku vzorku

Střední hodnota HV 0,2	833,5
Střední směrodatná odchylka HV 0,2	25,04

Metoda:	Vickers	Zatížení:	HV 0.1
Objektiv:	40x	Doba zatížení:	12.000

Tvrdost základu

	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	463.4	20.1	19.9	20.0
2	440.5	20.5	20.5	20.5
3	473.1	19.9	19.7	19.8
4	458.7	19.9	20.3	20.1

Tab. 12: Tvrdost základu nitrocementovaného vzorku

Minimum:	440.5	Maximum:	473.1	StDev:	13.698
Průměr:	458.9	Medián:	461.0		

Gradient tvrdosti od povrchu do jádra nitrocementované vrstvy

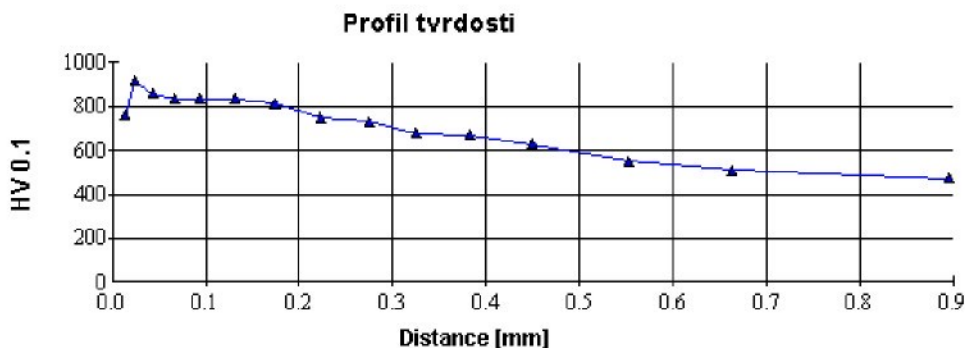
	Dist[μm]	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	13.4	758.3	15.2	16.0	15.6
2	24.6	916.2	14.3	14.2	14.2
3	43.6	857.4	14.6	14.8	14.7
4	66.2	833.7	14.8	15.0	14.9
5	93.8	833.4	14.6	15.2	14.9
6	131.1	833.4	14.8	15.0	14.9
7	174.1	811.4	15.0	15.2	15.1
8	222.9	749.2	15.6	15.8	15.7
9	274.3	730.4	15.6	16.2	15.9
10	324.6	677.6	16.4	16.6	16.5
11	382.4	668.3	16.7	16.7	16.7
12	449.0	629.3	17.1	17.3	17.2
13	551.8	549.3	18.1	18.7	18.4
14	662.4	507.2	18.9	19.3	19.1
15	894.9	472.5	19.9	19.7	19.8

Tab. 13: Gradient tvrdosti od povrchu do jádra nitrocementované vrstvy - vnější ozubení

Minimum:	472.5	Maximum:	916.2
Průměr:	721.8	Medián:	749.2
StDev:	134.973		

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost	ECD [μm]
560	538.0
510	655.2



Graf 3: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti

Metoda:	Vickers	Zatížení:	HV 0.1
Objektiv:	40x	Doba zatížení:	12.000

Tvrdost v jádře

	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	472.9	19.7	19.9	19.8
2	467.8	19.7	20.1	19.9
3	464.0	20.1	19.9	20.0

Minimum:	464.0	Maximum:	472.9
Průměr:	468.2	Medián:	467.8
StDev:	4.479		

Gradient od povrchu do jádra nitrocementovanou vrstvou – vnitřní drážkování:

	Dist[μm]	HV 0.1	d1 [μm]	d2 [μm]	d [μm]
1	17.0	729.7	15.7	16.2	15.9
2	30.4	797.0	15.3	15.2	15.3
3	117.1	779.2	15.2	15.6	15.4
4	149.6	758.9	15.4	15.8	15.6
5	187.0	712.9	16.0	16.2	16.1

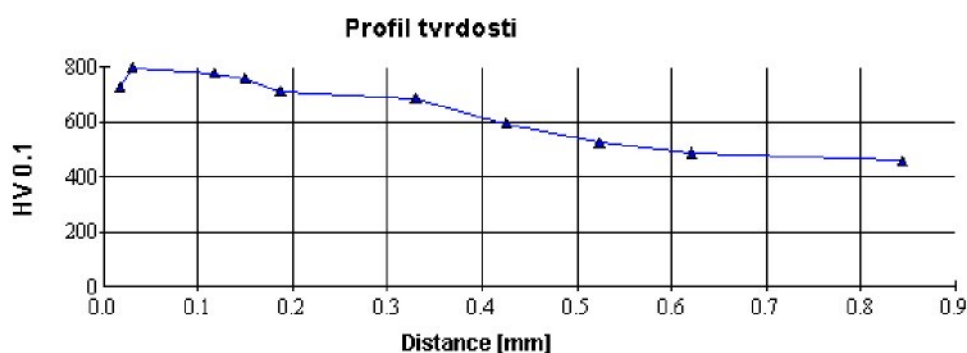
6	329.6	686.1	16.0	16.8	16.4
7	425.4	594.7	17.7	17.7	17.7
8	523.6	525.9	18.7	18.9	18.8
9	621.5	488.0	19.5	19.5	19.5
10	844.1	459.1	20.1	20.1	20.1

Tab. 14: Gradient od povrchu do jádra nitrocementovanou vrstvou – vnitřní drážkování

Minimum:	459.1	Maximum:	797.0	StDev:	125.968
Průměr:	653.2	Medián:	699.5		

Efektivní hloubka prokalení

Mezní tvrdost	ECD [μm]
560	475.0
510	564.7
460	837.2



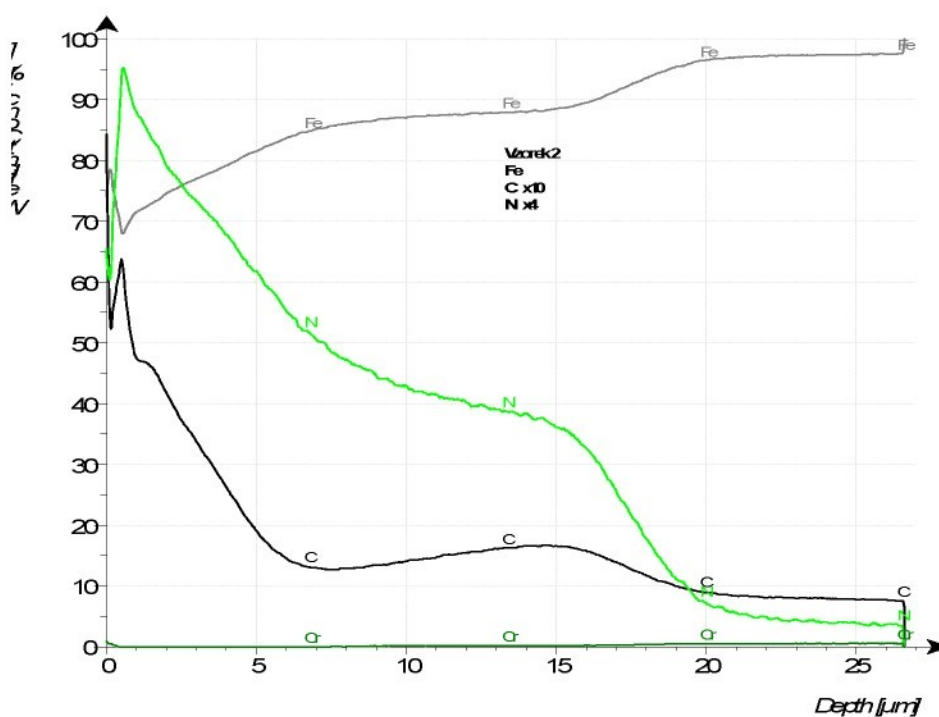
Graf 4: Nitrocementovaný vzorek- vnitřní drážkování - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti

3.4.3. Mikroanalýza chemického složení

V následujících grafech jsou vyobrazeny hmotnostní procenta železa, uhlíku a dusíku v závislosti na hloubce v mikrometrech. Pro karbonitridovaný vzorek je zde vyobrazeno i zastoupení chromu.

Karbonitridovaný vzorek

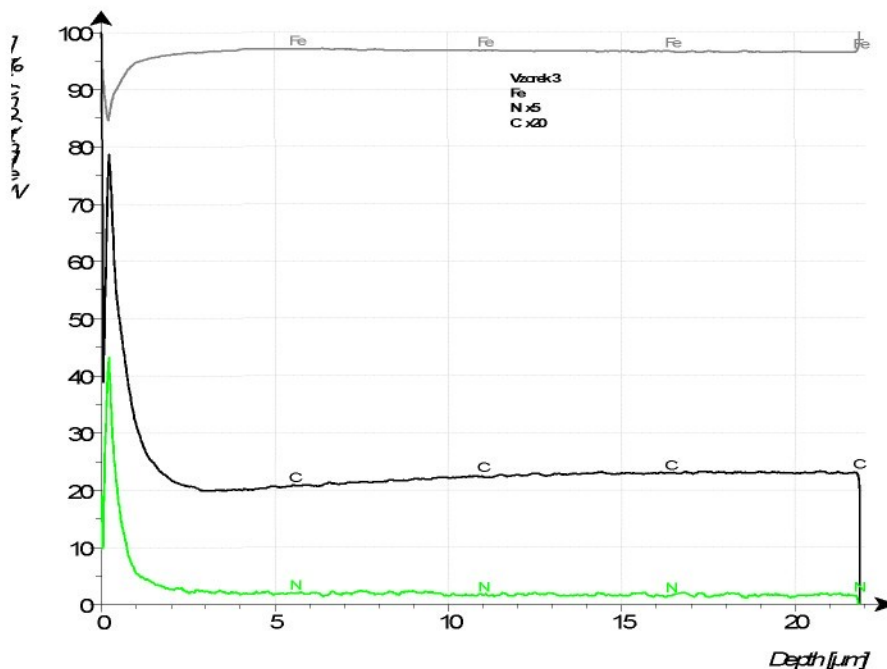
Hodnoty zastoupení železa a chromu jsou zde vyobrazeny přímo. Hodnoty uhlíku jsou v grafickém vyobrazení desetinasobně zvětšeny a hodnoty dusíku čtyřnásobně.



Graf 5: Karbonitridovaný vzorek- mikroanalýza chemického složení

Cementovaný vzorek

Hodnoty zastoupení železa jsou zde vyobrazeny přímo. Hodnoty uhlíku jsou v grafickém vyobrazení dvacetinásobně zvětšeny a hodnoty dusíku pětinašobně.



Graf 6: Nitrocementovaný vzorek- mikroanalýza chemického složení

4. Rozbor získaných výsledků

4.1. Karbonitridovaný vzorek

1. Pro vzorek byla změřena střední hodnota tvrdosti 932,53 HV a střední hodnota mikrotvrdosti 1011,3 HV. Tyto hodnoty odpovídají očekávané tvrdosti 1000 HV.

2. Požadovaná hloubka vrstvy se pohybuje v rozmezí 8 až 24 μm.

Na vzorku byla naměřena střední hodnota hloubky vrstvy 11,7 μm na vnějším ozubení a 10,85 μm na vnitřním drážkování, což plně vyhovuje požadavkům.

3. Rozbor metalografické analýzy

Na obrázcích číslo 1, 2, 3 a 4 je zřejmá kompaktní vrstva ε-karbonitridů. Rovnoměrná vrstvička je na povrchu nepatrně porézní a zakotvená jemnými výběžky do základního materiálu bez viditelné přechodové vrstvy. Jádro má perliticko-feritickou strukturu.

4. Rozbor mikroanalýzy chemického složení

Z grafu lze přesně odečíst procentuelní zastoupení prvků železa, uhlíku, dusíku a chromu v příslušné hloubce. Vypočtená střední hodnota tloušťky karbonitridované vrstvy (11,7 μm) se přibližně shoduje s oblastí v grafu, kde zvláště hodnoty dusíku začínají výrazně klesat k nule. V hloubce 28 μm jsou již hodnoty konstantní a měření bylo ukončeno. Hodnoty prvků jdou v této hloubce k nule, což je způsobeno ukončením měření, nikoliv skutečným procentuelním zastoupením.

4.2. Nitrocementovaný vzorek

1. Pro vzorek byla změřena střední hodnota tvrdosti 833,5 HV, což odpovídá očekávané tvrdosti 800 HV.

2. Požadovaná hloubka vrstvy se pohybuje v rozmezí 0,3 až 0,6 mm. Hloubka vrstvy byla odečtena z grafu gradientu tvrdosti od povrchu do jádra. K tvrdosti jádra (460 HV) byly přičteny hodnoty 50 a 100 HV a odečtena příslušná vzdálenost. Pro +50 byla zjištěna hloubka vrstvy 0,565 milimetrů a pro +100 činila hloubka vrstvy 0,475 milimetrů. Tyto hodnoty se shodují s požadovanými.

3. Rozbor metalografické analýzy

Na obrázcích číslo 5, 6, 7 a 8 je zřejmá jemná jehlicovitá struktura martensitu s odhadnutým zbytkovým austenitem přibližně 20 %.

4. Rozbor mikroanalýzy chemického složení

Zde, stejně jako v případě karbonitridovaného vzorku, lze přesně odečíst procentuelní zastoupení prvků železa, uhlíku a dusíku v příslušné hloubce. V hloubce 22 μm jsou již hodnoty konstantní a měření bylo ukončeno. Hodnoty prvků jdou v této hloubce k nule, což je způsobeno ukončením měření, nikoliv skutečným procentuelním zastoupením.

5. Závěr

V této bakalářské práci bylo podrobena zkoumání jádro spojky z převodovky MQ 200 dodané firmou Škoda-Auto. Jednalo se o karbonitridovanou součást. Pro porovnání vlastností jsem si zvolil nitrocementovanou součást, rovněž součást převodovky MQ 200. Zkoumanými parametry byla tvrdost, mikrotvrdost, hloubka vrstvy a hodnoty zastoupení hlavních prvků.

Rozbory a měření prokázaly, že zjištěné hodnoty odpovídají původním požadavkům kladeným na výsledné produkty procesů karbonitridace a nitrocementace. Všechny naměřené hodnoty tvrdosti, mikrotvrdosti a hloubky vrstvy byly změřeny vícekrát, aby byla zaručena objektivita měření. Statisticky byla vyhodnocena nejen průměrná hodnota, ale i další statistické údaje, které byly rovněž vyneseny do tabulek.

Cennými údaji jsou především výsledky mikroanalýzy chemického složení, které byly provedeny na moderním spektrometru s doutnavým výbojem Spectruma GDA 150. Tento přístroj umožňuje velmi přesné zjištění chemického složení vzorků a měl by být ve větší míře využíván laboratořemi v naší republice.

6. Seznamy

6.1. Seznam použitých symbolů

K	... rovnovážná konstanta
ΔG	... změna volné entalpie
[J.mol ⁻¹]	
T	... teplota
[K]	
P_X	... parciální tlak látky X v plynné fázi
[Pa]	
p'_X	... parciální tlak látky X v rovnováze s tuhým roztokem
[Pa]	
a_X	... termodynamická aktivita látky X v plynné fázi
a'_X	... termodynamická aktivita látky X v rovnováze s tuhým roztokem
y_X'	... aktivní koeficient látky X v tuhém roztoku
c'_X	... koncentrace látky X v tuhém roztoku
[mol.m ⁻³]	
K_N	... nitridační číslo
m	... váhové množství difundující látky
[kg]	
D	... koeficient difúze
[m ² .s]	
γ'_X	... koeficient aktivity látky X
E_a	... aktivační energie
[J.mol ⁻¹]	
a'_N	... termodynamická aktivita dusíku
$J_{X,D}$... difúzní tok látky x do
[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	
$J_{X,R}$... tok látky x do vrstvy v důsledku přestupových dějů
[kg.m ⁻² .s ⁻¹]	

6.2. Seznam literatury

- [1] - PŘENOSIL, B.: Nitrocementace, Praha 1964
- [2] - PLUHAŘ, J. a kol.: Nauka o materiálech, SNTL Praha 1989
- [3] - MACHEK V., SODOMKA J.: Nauka o materiálu, ČVUT Praha 2001
- [4] - ASOCIACE PRO TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ KOVŮ : Cementace a nitridace, Sborník přednášek Brno 2001
- [5] - KOUKALOVÁ R.: Nízkoteplotní karbonitridace PM ocelí - Diplomová práce, VŠCHT, Praha 1995
- [6] - PŘENOSIL B.- Výzkum optimální technologie nízkoteplotního karbonitridování v plynné atmosféře, Výzkumná zpráva SVÚM Z-68-2095, Praha 1969
- [7] - CAJNER F., LANDEK D.: Improvement of properties of steels applying salt bath nitrocarburizing with post-oxidation, University of Zagreb, Croatia 2003
- [8] - www.INDUSTRIALHEATING.com
- [9] - www.ASM-INTL.org
- [10] - www.GEARTECHNOLOGY.com
- [11] - www.LINDETECHNOPLYN.cz

- [12] - www.NITREX.com
- [13] - www.BODYCOTE.cz
- [14] - www.IPSEN-INTL.com
- [15] - www.THEMONTY.com
- [16] - www.SYRACUSEHEATTREATING.com
- [17] - www.DURFERRIT.com
- [18] - www.ELTROSERVICES.com
- [19] - www.SULZERMETCO.com
- [20] - www.GETOTTENASSOCIATES.com

6.3. Seznam tabulek a grafů

Seznam tabulek

- Tab. 1: Shrnutí základních parametrů procesů cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace
- Tab. 2: Tabulka, porovnávající základní charakteristiky procesu karbonitridace v solné lázni, v ochranné atmosféře a pomocí plasm vypracovaná Dr. Thomasem ze společnosti Metaplas Ionon, SRN
- Tab. 3: Tabulka základních parametrů procesu karbonitridace ve firmě Škoda-Auto
- Tab. 4: Tabulka základních parametrů procesu nitrocementace ve firmě Škoda-Auto
- Tab. 5: Tloušťka povrchové vrstvy karbonitridů - vnější ozubení
- Tab. 6: Tloušťka povrchové vrstvy karbonitridů – vnitřní drážkování
- Tab. 7: Karbonitridovaný vzorek - povrchová tvrdost HV 0,2 na boku vzorku
- Tab. 8: Tvrdost karbonitridované bílé vrstvičky vzorku
- Tab. 9: Gradient tvrdosti jádra - vnější ozubení
- Tab. 10: Gradient tvrdosti jádra – vnitřní drážkování
- Tab. 11: Nitrocementovaný vzorek - povrchová tvrdost HV 0,2 na boku vzorku
- Tab. 12: Tvrdost základu nitrocementovaného vzorku
- Tab. 13: Gradient tvrdosti do jádra nitrocementované vrstvy- vnější ozubení
- Tab. 14: Gradient od povrchu do jádra nitrocementovanou vrstvou – vnitřní drážkování

Seznam grafů

- Graf 1: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti
- Graf 2: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti
- Graf 3: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti
- Graf 4: Nitrocementovaný vzorek- vnitřní drážkování - závislost tvrdosti HV 0,1 na vzdálenosti
- Graf 5: Karbonitridovaný vzorek- mikroanalýza chemického složení
- Graf 6: Nitrocementovaný vzorek- mikroanalýza chemického složení

6.4. Seznam obrázků

- Obr. 1: Chemicko-tepelné zpracování- základní rozdělení
- Obr. 2: Typický průběh karbonitridace v solné lázni je znázorněn v následujícím grafu
- Obr. 3: Zařízení pro karbonitridaci v solné lázni firmy Houghton Durferrit, PA

- Obr. 4: Zařízení pro vkládání součástek do lázně
Obr. 5: Karbonitridační pec firmy Service Heat Treating, USA
Obr. 6: Grafické znázornění procesu Carbothan firmy Linde
Obr. 7: Součásti procházející iontovou nitridací v peci
Obr. 8: Plasmová pec pro excentrické hřídele firmy Eltro, USA
Obr. 9: Diagram rovnovážné soustavy Fe - C
Obr. 10: Diagram rovnovážné soustavy Fe - N
Obr. 11: Rovnovážený diagram ternární soustavy Fe - C - N pro $T=450^{\circ}\text{C}$
Obr. 12: Porovnání oblastí s eutektoidní přeměnou u rovnovážných soustav Fe-C a Fe-N
Obr. 13: Schématické znázornění dějů na fázovém rozhraní sytící atmosféry a oceli
Obr. 14: Jádru spojky po odebírání vzorků pro metalografickou analýzu
Obr. 15: Konstrukce zámkové synchronizace - jednotlivé části
Obr. 16: Zámková synchronizace po kompletaci
Obr. 14: Jádru spojky po odebírání vzorků pro metalografickou analýzu
Obr. 17: Nitrocementované ozubené kolo po debrání vzorků
Obr. 18: Buehler- Delta abrasimet cutter
Obr. 19: Buehler- Simplimet 2 Mounting press
Obr. 20: Brusné kotouče
Obr. 21: Optický mikroskop Neophot 32 od firmy Carl Zeiss Jena
Obr. 22: Tvrdoměr Zwick 3212
Obr. 23: Mikrotvrdoměru Buehler Micrometr 21011
Obr. 24: Spectruma GDA 150 od firmy Spectruma-Analytik GmbH
Obr. 25: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát
Obr. 26: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát
Obr. 27: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 200 krát
Obr. 28: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 500 krát
Obr. 29: Karbonitridovaný vzorek- pata zubu- zvětšeno 200 krát
Obr. 30: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát
Obr. 31: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát

6.5. Seznam příloh

- Obr. 14: Jádru spojky po odebírání vzorků pro metalografickou analýzu
Obr. 17: Nitrocementované ozubené kolo po debrání vzorků
Obr. 18: Buehler- Delta abrasimet cutter
Obr. 19: Buehler- Simplimet 2 Mounting press
Obr. 20: Brusné kotouče
Obr. 21: Optický mikroskop Neophot 32 od firmy Carl Zeiss Jena
Obr. 22: Tvrdoměr Zwick 3212
Obr. 23: Mikrotvrdoměru Buehler Micrometr 21011
Obr. 24: Spectruma GDA 150 od firmy Spectruma-Analytik GmbH
Obr. 25: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát
Obr. 26: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát
Obr. 27: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 200 krát
Obr. 28: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 500 krát
Obr. 29: Karbonitridovaný vzorek- pata zubu- zvětšeno 200 krát
Obr. 30: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát
Obr. 31: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát

7. Přílohy



Obr. 14: Jádro spojky po odebání vzorků pro metalografickou analýzu



Obr. 17: Nitrocementované ozubené kolo po debrání vzorků



Obr. 18: Buehler- Delta abrasimet cutter



Obr. 19: Buehler- Simplimet 2 Mounting press



Obr. 20: Brusné kotouče



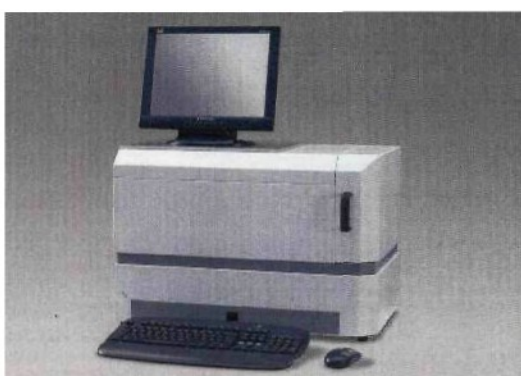
Obr. 21: Optický mikroskop Neophot 32 od firmy Carl Zeiss Jena



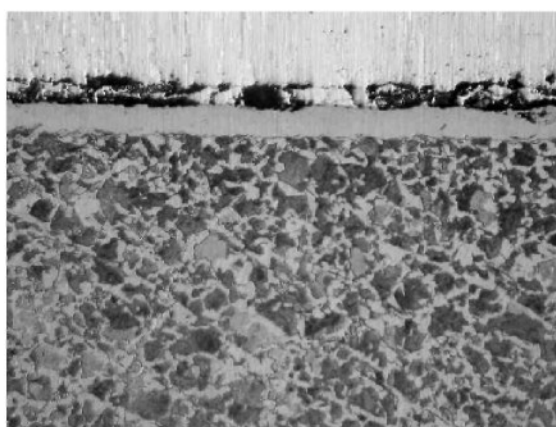
Obr. 22: Tvrdoměr Zwick 3212



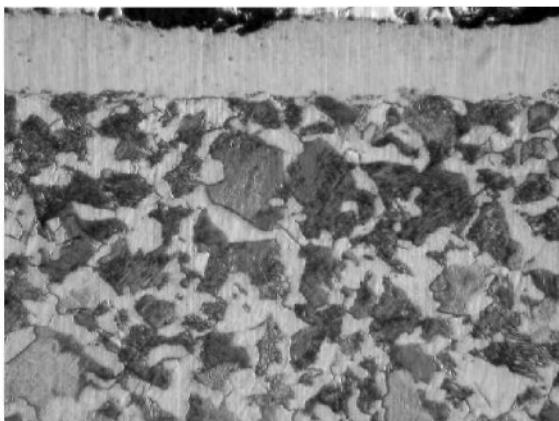
Obr. 23: Mikrotvrdoměru Buehler Micrometr 21011



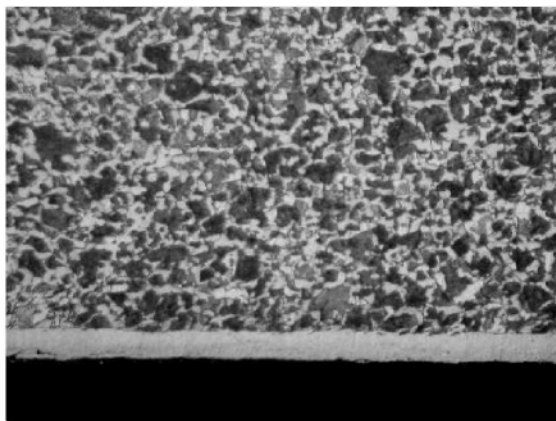
Obr. 24: Spectruma GDA 150 od firmy Spectruma-Analytik GmbH



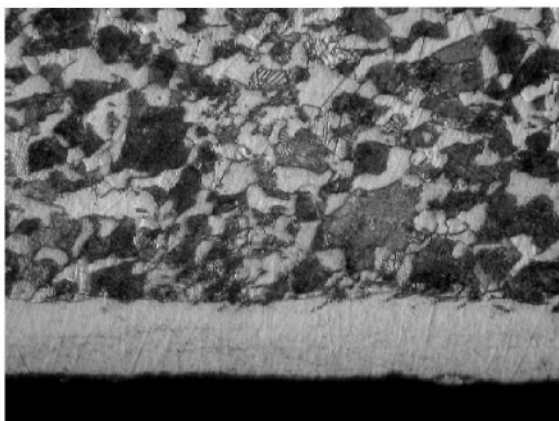
Obr. 25: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát



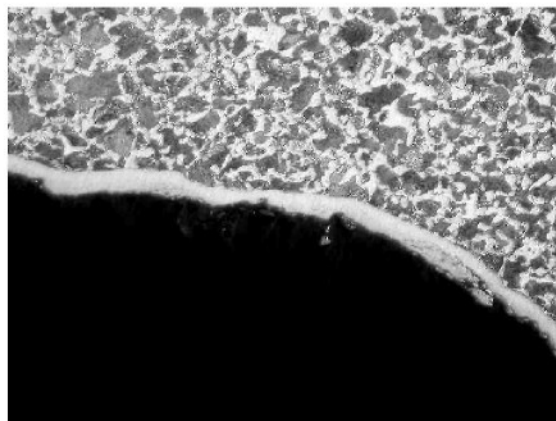
Obr. 26: Karbonitridovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát



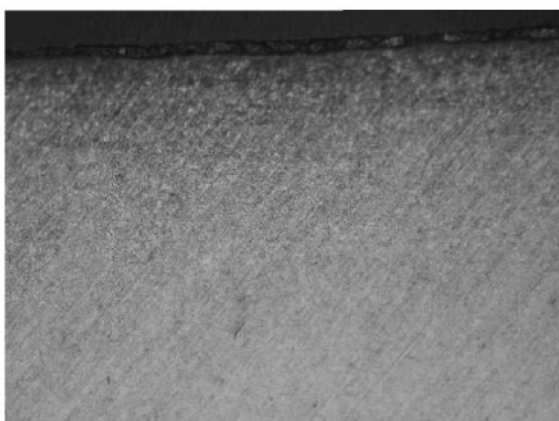
Obr. 27: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 200 krát



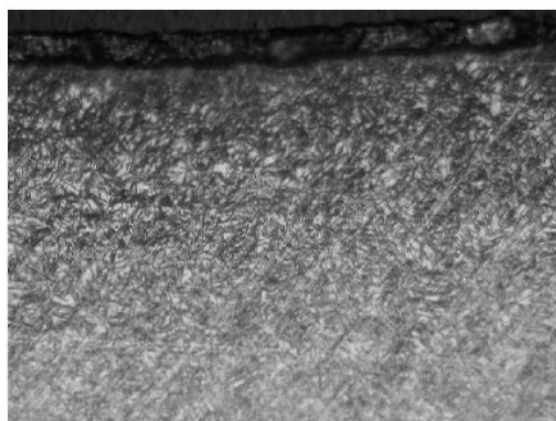
Obr. 28: Karbonitridovaný vzorek- vnitřní drážkování- zvětšeno 500 krát



Obr. 29: Karbonitridovaný vzorek- pata zubu- zvětšeno 200 krát



Obr. 30: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 200 krát



Obr. 31: Nitrocementovaný vzorek- vnější ozubení- zvětšeno 500 krát