



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV MATERIÁLOVÝCH VĚD A INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MATERIALS SCIENCE AND ENGINEERING

CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ OCELÍ

CHEMICAL HEAT TREATMENT OF STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

DAVID PIŠEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. KAREL NĚMEC, Ph.D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav materiálových věd a inženýrství
Akademický rok: 2014/15

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): David Pišek

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Chemicko-tepelné zpracování ocelí

v anglickém jazyce:

Chemical heat treatment of steel

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Zpracování přehledu metod chemicko-tepelného zpracování kovů se zaměřením zejména na cementaci a nitridaci ocelí. Zhodnocení výhod a nevýhod metod pro praktické aplikace.

Cíle bakalářské práce:

- 1) Vypracování přehledu metod chemicko-tepelného zpracování
- 2) Podrobný popis nitridace a cementace ocelí
- 3) Zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých metod
- 4) Shrnutí získaných poznatků

Seznam odborné literatury:

- 1) HAZLINGER, Marián, MORAVČÍK Roman. Chemicko-tepelné spracovanie materiálov, STU, 2013, 169 s., ISBN: 9788022739245
- 2) HOLEMÁŘ, Alois, HRUBÝ, Vojtěch. Iontová nitridace v praxi. Vyd. 1. Praha: SNTL, 1989, 242 s., ISBN 80-03-00001-7
- 3) PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-248-3
- 4) ZÁBAVNÍK, Viktor. Chemicko - tepelné spracovanie kovov. Košice: Technická univerzita, 141 s.
- 5) SMÓLING, Kálmán. Tepelné a chemicko-tepelné spracovanie v príkladoch. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 383 s.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Karel Němec, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/15.

V Brně, dne 2. 2. 2015



prof. Ing. Ivo Dlouhý, CSc.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan

Abstrakt

Tato bakalářská práce se zabývá metodami chemicko-tepelného zpracování ocelí. Obsahuje základní poznatky a způsoby provedení chemicko-tepelného zpracování s detailním zaměřením na cementaci a nitridaci ocelí. Zaměřuje se také na vlastnosti povrchových vrstev a jejich využití. Cílem práce je vypracování přehledu nejčastěji používaných metod chemicko-tepelného zpracování ocelí a následném zhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých metod pro praktické aplikace v průmyslu.

Abstract

This bachelor thesis deals with methods of chemical and heat treatment of steel. This thesis incorporates basic findings and ways of the performance of the chemical and heat treatment with detailed specialization in cementation and nitration of steels. This study is also focused on property of surface layers and their use. The primary aim of this thesis is to evolve an overview of the most frequent methods of chemical and heat treatment of steel and to evaluate advantages and disadvantages of individual methods for a practical use in industry.

Klíčová slova

Chemicko-tepelné zpracování ocelí, difuze, cementace, nitridace, nitrocementování, karbonitridace, sulfonitridace, boridování, chromování, křemíkování, hliníkování, cementační oceli, nitridační oceli

Keywords

Chemical heat treatment of steels, diffusion, cementation, nitriding, nitrocementation, carbonitriding, sulfonitriding, boriding, chrome plating, siliconizing, aluminizing, cementation steels, nitriding steels

Bibliografická citace:

PIŠEK, D. *Chemicko-tepelné zpracování ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci na téma Chemicko-tepelné zpracování ocelí vypracoval samostatně pod vedením Ing. Karla Němce, Ph.D., s využitím odborné literatury a pramenů vypsanych v seznamu citací.

V Brně dne 27. 5. 2015

.....
David Pišek

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat panu Ing. Karlu Němcovi Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce. Dále chci poděkovat své rodině a přítelkyni za trpělivost a podporu po dobu mého studia.

Obsah

1 Úvod	10
2 Chemicko-tepelné zpracování	11
2.1 Definice chemicko-tepelného zpracování a jeho význam.....	11
2.2 Rozdělení metod chemicko-tepelného zpracování.....	11
3 Základní dílčí procesy při chemicko-tepelném zpracování	13
3.1 Adsorpce molekul chemických sloučenin.....	13
3.2 Disociace adsorbovaných molekul.....	13
3.3 Absorpce atomů nasycovaným povrchem.....	14
3.4 Difuze absorbovaných atomů	14
4 Cementace	16
4.1 Hloubka cementované vrstvy	16
4.2 Obsah uhlíku v cementační vrstvě.....	18
4.3 Způsoby cementace	18
4.3.1 Cementace v pevném prostředí (v prášku)	19
4.3.2 Cementace v kapalném prostředí.....	19
4.3.3 Cementace v plynném prostředí	20
4.3.4 Moderní metody cementace.....	21
4.4 Tepelné zpracování po cementaci	22
4.5 Oceli k cementaci	23
5 Nitridace	25
5.1 Struktura nitridované vrstvy	25
5.2 Hloubka nitridované vrstvy	27
5.3 Způsoby nitridace	28
5.3.1 Nitridace v solných lázních	28
5.3.2 Nitridace v plynném prostředí	29
5.3.3 Iontová (plazmová) nitridace	29
5.4 Oceli k nitridaci	33
6 Přehled metod chemicko-tepelného zpracování ocelí	35
6.1 Nitrocementace a karbonitridace.....	35

6.2 Sulfonitridace	36
6.3 Boridování	37
6.4 Difuzní křemíkování.....	39
6.5 Alitování (difuzní hliníkování).....	39
6.6 Difuzní chromování.....	40
7 Závěr.....	41
Seznam použité literatury.....	42

1 Úvod

Povrchové úpravy materiálů v dnešní době nacházejí široké uplatnění v různých průmyslových odvětvích. Patří mezi ně též chemicko-tepelné zpracování, které je hojně využíváno ve strojírenském průmyslu. Při tomto procesu se modifikuje chemické složení povrchu a podpovrchových vrstev součástí. Cílem je většinou vysoká tvrdost a odolnost proti opotřebení povrchu dílce při zachování vysoce houževnatého jádra, které odolává dynamickému namáhání. Tyto specifické vlastnosti se využívají při konstruování součástí v mnoha oblastech výroby.

Bakalářská práce je stylizována tak, aby přehledně popsala jednotlivé metody chemicko-tepelného zpracování s detailním zaměřením na cementaci a nitridaci. Dále práce popisuje vlastnosti difuzní vrstvy vzniklé při chemicko-tepelném zpracování. Závěr bakalářské práce je věnován vyhodnocení výhod a nevýhod jednotlivých metod a jejich využití v praxi.

2 Chemicko-tepelné zpracování

2.1 Definice chemicko-tepelného zpracování a jeho význam

Podstatou chemicko-tepelného zpracování je změna chemického složení povrchu materiálů, při které se dosahuje žádaných mechanických a fyzikálních vlastností. Tuto změnu chemického složení zajišťujeme chemickým působením aktivního prostředí při zvýšených teplotách. Norma ČSN 42 0004 definuje chemicko-tepelné zpracování jako proces, při kterém dochází k sycení povrchu. Vzniká tedy povrchová vrstva, která se také nazývá difuzní. Nemusí však vždy docházet k sycení povrchu daným prvkem, ale může dojít i ke snižování obsahu některých prvků, např. oduhličovací žíhání transformátorových plechů nebo vysokolegovaných manganových ocelí [2].

Hlavním účelem chemicko-tepelného zpracování je zvýšení tvrdosti povrchu, jeho odolnosti proti opotřebení, otěru nebo únavě při zachování vysoce houževnatého jádra. Některé metody mohou zvyšovat odolnost součásti i proti korozi nebo žáru (např. hliníkování, chromování). Těchto vlastností lze dosáhnout buď přímo, tedy obohacováním povrchu daným prvkem při zvýšené teplotě a pomalým ochlazováním, nebo následným tepelným zpracováním. Při zvolení vhodné oceli a způsobu chemicko-tepelného zpracování můžeme docílit podstatného zvýšení životnosti a kvality povrchu nízkolegovaných ocelí, které tak mohou nahradit dražší a deficitní vysokolegované oceli. Tento způsob zpracování umožňuje firmám snižovat náklady na výrobu [1, 8].

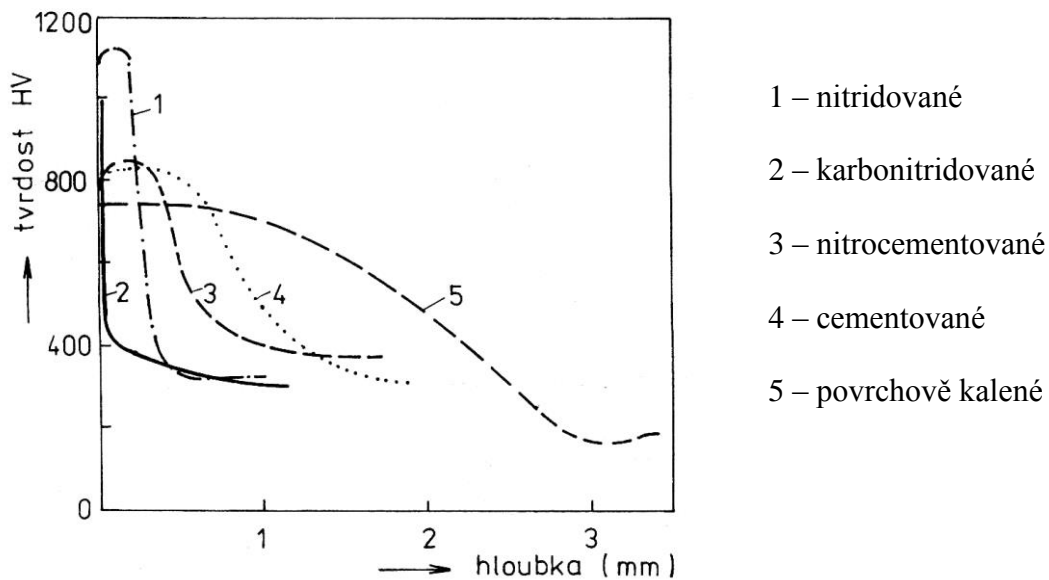
2.2 Rozdělení metod chemicko-tepelného zpracování

Metody chemicko-tepelného zpracování se dělí podle toho, jaké difundující prvky jsou použity při procesu. Jsou využívány prvky, které jsou schopny vytvářet v krystalické mřížce chemické sloučeniny, intersticiální tuhé roztoky (C, N, B, H) nebo substituční tuhé roztoky (Al, Cr, Si a další). Tato vlastnost jim umožňuje pronikat do krystalografické struktury. Podle užitého prvku rozlišujeme tyto metody:

- cementace (uhlík),
- nitridace (dusík),
- nitrocementace a karbonitridace (dusík a uhlík),
- sulfonitridace (síra a dusík),
- boridování (bor),
- difuzní křemíkování (křemík),
- alitování (hliník),
- difuzní chromování (chrom) a další metody [2].

Metody jsou užívány podle toho, jaké jsou požadované vlastnosti povrchu součásti a jaké bude její další využití. Každá metoda má svůj specifický průběh a vlastnosti – za jakých teplot probíhá, délka působení a typ aktivního prostředí, rychlost ochlazování nebo následné tepelné zpracování. Každý způsob chemicko-tepelného

zpracování vyznačuje jiné vlastnosti vzniklé difuzní vrstvy. Nejčastěji jsou používány cementace, nitridace a jejich kombinace nitrocementace. Při chemicko-tepelném zpracování dochází v krystalografické struktuře povrchu ke vzniku tuhých roztoků, chemických sloučenin nebo k fázovým přeměnám. Při ochlazování mohou vznikat v difuzní vrstvě směsi fází. Srovnání tvrdosti a hloubky difuzní vrstvy vybraných metod je zobrazeno v grafu na obr. 2.1.



Obr. 2.1 Srovnání hloubky a tvrdosti difuzní vrstvy jednotlivých metod [13].

3 Základní dílčí procesy při chemicko-tepelném zpracování

Jak již bylo uvedeno, při chemicko-tepelném zpracování jsou používány prvky, které jsou schopny v povrchové struktuře materiálu vytvářet chemické sloučeniny, intersticiální tuhé roztoky nebo substituční tuhé roztoky. Rozkladem chemických sloučenin na nasycovaném povrchu vznikají tzv. aktivní atomy. Tyto atomy pronikají povrchem, jsou absorbovány a dále se přemísťují směrem od povrchu do difuzní vrstvy pomocí difuze.

Základní dílčí procesy chemicko-tepelného zpracování jsou:

1. adsorpce – „vázání“ molekul chemických sloučenin nasycovaným povrchem,
2. disociace – rozklad chemických sloučenin a uvolnění aktivních atomů,
3. absorpce – pohlcení aktivních atomů absorpčním povrchem,
4. difuze – přemísťování absorbovaných atomů směrem od povrchu do difuzní vrstvy.

Tyto čtyři dílčí procesy probíhají současně a jsou spolu velice úzce svázány. Poměr rychlostí procesů určuje výsledné vlastnosti a rychlost tvorby difuzní vrstvy. Aby vůbec vznikla difuzní vrstva, musí být zajištěna vzájemná reakce mezi základním materiálem a nasycujícím prvkem [2].

3.1 Adsorpce molekul chemických sloučenin

Jedná se o slabou interakci mezi molekulami chemických sloučenin a povrchem základního materiálu. Adsorpce molekul je závislá na tom, v jakém stavu se nachází adsorpční povrch. Neprobíhá totiž na celém povrchu, ale jen v aktivních místech, v tzv. multiplétách, které se vyznačují vhodnou krystalografickou stavbou pro adsorpci. Počet aktivních míst se odvíjí od toho, jak moc je povrch znečištěn a zoxidován. Vhodnou mechanickou, chemickou nebo fyzikální úpravou povrchu lze počet aktivních míst zvýšit. Úpravy povrchu mají velký význam u metod chemicko-tepelného zpracování, které probíhají při nižších teplotách, např. u nitridace [1].

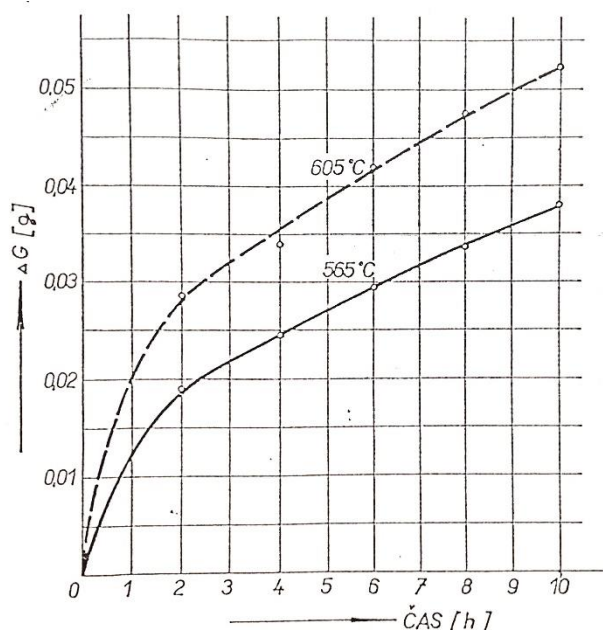
3.2 Disociace adsorbovaných molekul

Při disociaci dochází k rozkladu molekul chemických sloučenin a vznikají volné aktivní atomy. Tento proces se řídí mnoha známými zákony chemických reakcí. Jedním z nich je Guldberg-Waagův zákon, který tvrdí, že všechny chemické reakce směřují k rovnovážnému stavu. V rovnovážném stavu je poměr součinu koncentrace vstupujících látek do reakce a součin koncentrace látek vznikajících při reakci stále stejný. Jedná se tedy o rovnovážnou konstantu, která se mění tlakem a teplotou.

Rychlost chemické reakce, při určitých podmínkách (tlak, teplota, katalyzátor), závisí na koncentraci dané reagující látky. Pokud bude koncentrace této látky vysoká, chemická reakce bude probíhat nejrychleji. Dalším faktorem, který ovlivňuje rychlost chemické reakce, je adsorbovatelnost produktů disociace. Pokud je adsorbovatelnost povrchem jiného prvku, např. vodíku, vyšší, obsazuje aktivní místa a zabraňuje tak přístupu molekulám, které jsou schopny uvolňovat atomy potřebné pro nasycení. Pro zvýšení rychlosti disociace je nutné tyto molekuly odstranit např. ultrazvukem nebo pohlcovači [1].

3.3 Absorpce atomů nasycovaným povrchem

Pouze malá část atomů vzniklých disociací molekul je absorbována (pohlčena) povrchem základního materiálu. Je dokázáno, že závislost počtu absorbovaných atomů na čase chemicko-tepelného zpracování vykazuje parabolický průběh (viz obr. 3.1.). Koncentrace absorbovaných atomů má výrazný vliv na rychlost růstu difuzní vrstvy. V dnešní době se procesy chemicko-tepelného zpracování provádí za takových podmínek, aby byla koncentrace a aktivita absorbovaných atomů co největší. Někdy může dojít i k přesycení difuzní vrstvy, což je u některých metod nežádoucí [1].



Obr. 3.1 Závislost počtu absorbovaného dusíku na čase nasycování oceli 15 330 v atmosféře NH_3 , při teplotě 565 a 560°C [1].

3.4 Difuze absorbovaných atomů

Absorbované atomy se pohybují základním materiálem na základě difuzních zákonů. Difuze je často definována jako přenosový děj, při kterém dochází k přemísťování látky základním materiálem. Většinou se tak děje od místa s vyšší koncentrací látky do místa s nižší koncentrací látky (koncentrační spád). Dělí se zpravidla na dvě hlavní skupiny, a to podle toho, jakým mechanismem probíhá – difuze intersticiální a vakantní. Difuze je ovlivňována několika faktory, především teplotou, krystalickou mřížkou, vazbami mezi atomy a také mřížkovými poruchami. Při vyšších

teplotách probíhá rychleji a snadněji, jelikož atomy kmitají kolem svých uzlových bodů s větší frekvencí. Difuze atomů na volném povrchu probíhá rychleji než v krystalografické struktuře, protože atomy potřebují větší energii, aby se mohly přemisťovat krystalickou mřížkou. Z fenomenologického hlediska se pro popis difuze používají Fickovy zákony [9, 12].

První Fickův zákon platí pouze u stacionární difuze, to znamená, že se koncentrace difundující látky s časem nemění, $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$. Znění prvního Fickova zákona:

$$J = -D \cdot \frac{dc}{dx}$$

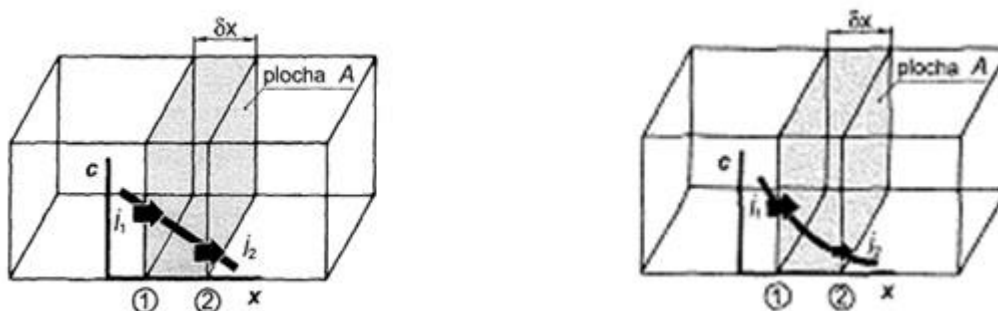
kde J [mol.m⁻².s⁻¹] je difuzní tok, D [m².s⁻¹] je celkový koeficient difuze, $\frac{dc}{dx}$ [mol.m⁻³.m⁻¹] je gradient koncentrace.

Z prvního Fickova zákona vyplývá, že J má opačný směr než $\frac{dc}{dx}$, tudíž se atomy přenáší z místa vyšší koncentrace do místa s nižší koncentrací atomů. V reálných situacích může docházet k tomu, že J i $\frac{dc}{dx}$ mohou mít stejný směr, a proto se bude koncentrační rozdíl zvyšovat.

Koncentrace difundující látky se však může s časem i měnit, to je případ nestacionární difuze. V tomto případě je nutné vycházet z druhého Fickova zákona difuze ($D = \text{konst.}$):

$$\frac{\partial c}{\partial \tau} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

kde $\frac{\partial c}{\partial \tau}$ je změna koncentrace v závislosti na čase rychlosti změny koncentrace, $\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ je křivost koncentračního profilu v místě x . Schéma stacionární a nestacionární difuze je zobrazeno na obr. 3.2 [12].

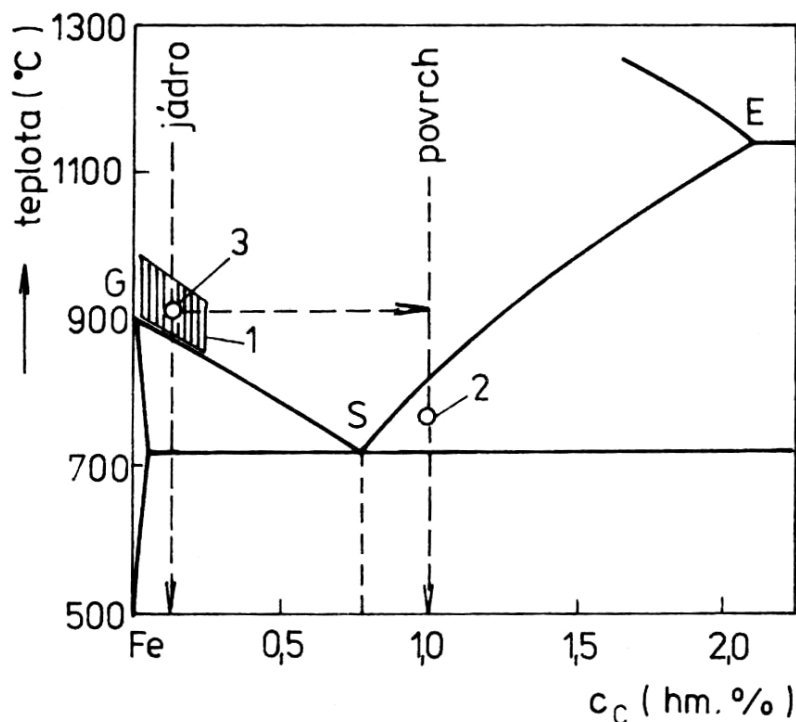


Obr. 3.2 Schéma stacionární a nestacionární difuze [19].

Znalosti o faktorech, které ovlivňují tyto čtyři dílčí procesy, nám umožní vytvářet takové podmínky pro chemicko-tepelné zpracování, abychom získali co nejlepší vlastnosti difuzních vrstev [2, 12].

4 Cementace

Cementace je jedna z nepoužívanějších metod chemicko-tepelného zpracování, při které dochází k difuznímu sycení povrchu oceli uhlíkem. Proces probíhá nad teplotou A_{c3} , tedy při teplotách 910 – 930 °C v plynném, kapalném nebo pevném prostředí (viz graf Fe-Fe₃C na obr. 4.1). Cementovaná vrstva vykazuje vysokou povrchovou tvrdost (až 800 HV), zvýšenou odolnost proti únavě, opotřebení a otěru. Hloubka difuzní vrstvy se odvíjí od konstrukčního řešení a způsobu namáhání součásti, obvykle dosahuje hodnot 0,5 – 1,5 mm. Koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě se pohybuje od 0,75 do 1,1 %. Cementují se většinou konstrukční, uhlíkové a slitinové oceli. Ocel by měla mít vysokou houževnatost jádra, aby dokázala „unést“ tvrdou povrchovou vrstvu a nedocházelo k protlačení při přenášení měrných tlaků. Nejčastěji cementované součásti jsou ozubená kola, řetězová kola, pouzdra, vodítka, hřídele, čepy, vačky atd. Po cementování je nutné provést tepelné zpracování součásti (martenzitické kalení, dvojité kalení, popouštění při nízkých teplotách a další) [4, 5].



Obr. 4.1 Schéma cementace v diagramu Fe-Fe₃C [13].

4.1 Hloubka cementované vrstvy

Hloubka cementované vrstvy je silně spjatá s tím, jak bude součást namáhána a jaké je její konstrukční řešení nebo velikost součásti. Dosahuje hodnot 0,5 – 1,5 mm. Musí se také zohlednit požadavky na nosnost vrstvy a broušení po tepelném zpracování. Přídavek na broušení bývá zhruba 0,05 – 0,25 mm a nesmí ovlivňovat funkci

povrchové vrstvy, tudíž se musí zachovat požadované mechanické vlastnosti povrchu. Podle hloubky můžeme rozdělit cementační vrstvu do tří skupin [1]:

- tenká – dosahuje hloubky 0,5 mm, používá se pro menší měrné tlaky,
- střední – do 1,5 mm,
- silná – nad 1,5 mm, velké měrné tlaky [5].

Při konečném tepelném zpracování může docházet k tzv. bortění, kdy se mění tvar dané součástky. Míra bortění je opět závislá na konstrukci součásti, proto by součást měla být navrhnutá tak, aby se tento jev co nejvíce omezil. Hloubka vrstvy se určuje pomocí měření tvrdosti povrchu nebo měření lupou na naleptaném výbruse [1].

Rychlost růstu cementační vrstvy velmi ovlivňují legující prvky, které se nacházejí v oceli. Karbidotvorné legující prvky (Mn, Mo, V, W, Cr) snižují koeficient difuze uhlíku, a tudíž snižují rychlost difuze. Na druhou stranu vytváří karbidy, a tím zvyšují obsah uhlíku v povrchové vrstvě. Nejvíce zvyšuje obsah uhlíku chrom. Nekarbidotvorné prvky (Si, Ni) snižují obsah uhlíku a zpomalují difuzi uhlíku v povrchové vrstvě [1].

Volba hloubky cementované vrstvy pro různé průměry hřídelů a děr nebo tloušťky stěn se volí dle normy ON 42 0020 (viz tab. 4.1). Hloubka cementační vrstvy u ozubených kol se volí podle modulu ozubeného kola (viz tab. 4.2) [10].

Tab. 4.1 Doporučená hloubka cementované vrstvy u součástí (hodnoty v mm) [10].

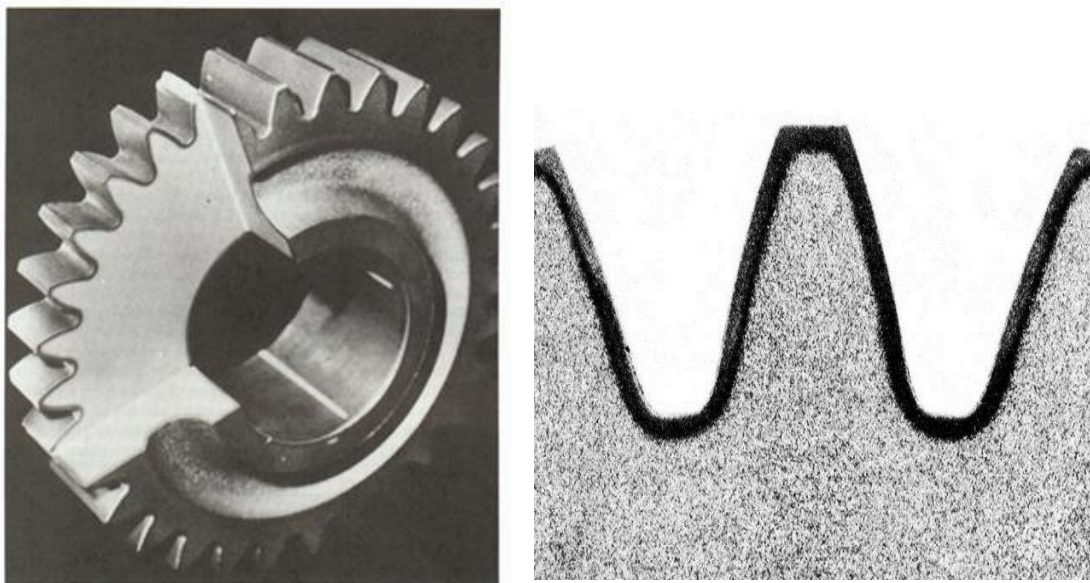
Průměr hřídele nebo díry, popřípadě tloušťka stěny	Hloubka cementované vrstvy
10	0,3 – 0,5
20	0,4 – 0,5
30	0,5 – 0,7
40	0,6 – 0,8
50	0,7 – 0,9
60 – 80	0,8 – 1,0
80 – 100	0,9 – 1,1
100 – 150	1,0 – 1,3

Tab. 4.2 Doporučená hloubka cementované vrstvy u ozubených kol (hodnoty v mm) [10].

Normální modul m_n	Hloubka cementované vrstvy
1	0,3 – 0,5
2	0,4 – 0,6
3	0,5 – 0,7
4	0,6 – 0,8
5	0,7 – 1,0
6	0,8 – 1,1
7	0,9 – 1,2
8 – 10	1,0 – 1,3

4.2 Obsah uhlíku v cementační vrstvě

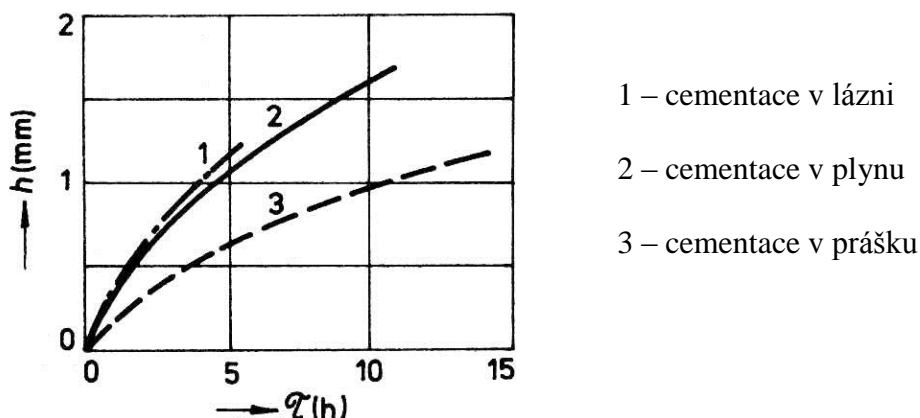
Koncentrace uhlíku v difuzní vrstvě není ve všech hloubkách stejná, a tím výrazně ovlivňuje mechanické vlastnosti povrchu. Ideální hodnota koncentrace uhlíku ve vrstvě se udává 0,75 – 1,1 %, což je hodnota blízká eutektoidní koncentraci. Cementovaná vrstva se skládá z pásma nadeutektoidního (sekundární cementit a perlit), eutektoidního a podeutektoidního (perlit a ferit). Při vyšším obsahu uhlíku ve vrstvě klesá mez pevnosti v ohybu a krutu, vrubová houževnatost a mez únavy. Negativní vliv na tyto mechanické vlastnosti má síťový sekundární cementit, který se vylučuje po hranicích austenitických zrn při ochlazování. Obsah uhlíku v cementační vrstvě ovlivňuje řada faktorů, především sytící schopnost cementačního prostředí (uhlíkový potenciál), teplota a doba cementace a legující prvky. Řez cementovaného ozubeného kola je zobrazen na obr. 4.2 [5, 2].



Obr. 4.2 Řez cementovaného ozubeného kola [13].

4.3 Způsoby cementace

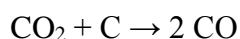
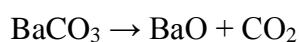
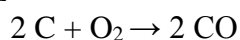
Cementace se provádí v plynném, pevném nebo kapalném prostředí. Podle použití metody cementace se odvíjí hloubka cementační vrstvy (viz obr. 4.3). Každé prostředí má svůj tzv. uhlíkový potenciál, což je sytící schopnost daného cementačního prostředí. Uhlíkový potenciál se dá regulovat v průběhu sycení pomocí míšení prostředí. Doba a teplota sycení se odvíjí od zvoleného způsobu cementace. U ocelí dědičně jemnozrnných můžeme použít tzv. vysokoteplotní cementování, které probíhá při teplotě až 1050 °C. Ocel je schopná i při těchto vysokých teplotách zachovat jemné zrna. V dnešní době se také používají některé moderní metody cementace, např. plazmová cementace nebo vakuová (podtlaková) cementace [5, 8].



Obr. 4.3 Hloubka cementované vrstvy [13].

4.3.1 Cementace v pevném prostředí (v prášku)

Cementace v prášku lze považovat za nejstarší způsob cementace. Doba a teplota sycení v pevném prostředí se odvíjí od toho, jakých mechanických vlastností je potřeba dosáhnout. Zpravidla dochází k sycení při teplotách 920 – 930 °C po dobu 6 hodin, kdy hloubka vrstvy dosahuje přibližně 0,9 mm. Součástky jsou zasypány cementační směsí ve speciálních krabicích. Cementační směs se skládá ze zrnitého dřevěného uhlí o průměru zrna 2 – 9 mm a katalyzátoru, např. BaCO₃. V této směsi dochází k následujícím reakcím [1, 4]:



Poměr CO : CO₂ ve směsi by měl dosahovat 99 : 1. Tento způsob cementace je poměrně zastaralý a v dnešní době se už tolik nepoužívá. Nevýhodou je doba trvání procesu, kdy ohřev vsázky na nasycovací teplotu a ochlazování vsázky je velmi zdoluhavý. Proces není dokonalý, tudíž často vznikají nerovnoměrné vrstvy. Výhodou jsou nízké náklady a nenáročnost procesu. Používá se na menší a jednodušší součástky [1, 5].

4.3.2 Cementace v kapalném prostředí

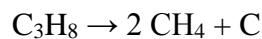
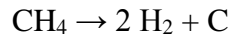
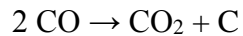
V praxi není cementace v lázních až tak rozšířená, ale občas se používá. Cementuje se v solných lázních, které se skládají z 80 % Na₂CO₃ nebo K₂CO₃, 10 – 15 % NaCl, 6 – 8 % SiC. Uhlík se uvolňuje při reakci [1]:



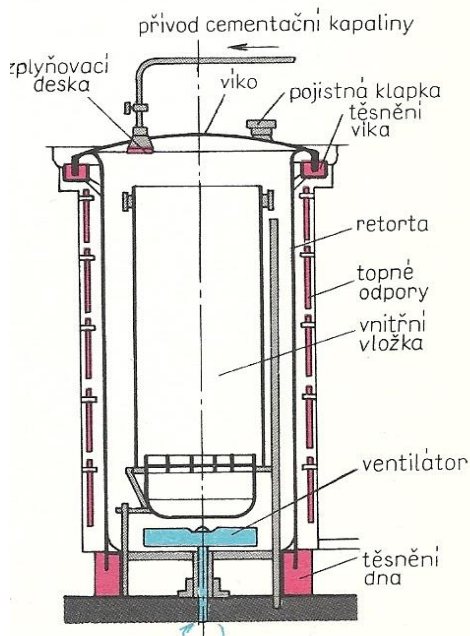
Cementování v solných lázních je poměrně rychlé a nauhličená vrstva je rovnoměrná po celém povrchu dílce. Po procesu je možné součást ihned zakalit [4].

4.3.3 Cementace v plynném prostředí

Jedná se o nejpoužívanější způsob cementace. Největší výhodou je možnost regulace atmosféry a snižování či zvyšování uhlíkového potenciálu atmosféry (schopnost atmosféry sytit povrch). To nám umožňuje perfektní kontrolu nad nauhličovací atmosférou. Plynné prostředí se skládá především z oxidu uhličitého (CO₂) a uhlovodíků (metan – CH₄, butan – C₄H₁₀, propan – C₃H₈). Rozkladem těchto sloučenin vzniká aktivní uhlík [1, 4]:



Aktivní atmosféra vzniká většinou mimo vlastní pec. Vzniká spalováním, odpařováním nebo katalytickým rozkladem kapaliny – terpentýnu, acetonu, lihu nebo teralu (směs acetonu, terpentýnu a ethylalkoholu). Někdy se přidává 3 – 5 % amoniaku, který urychluje difuzi uhlíku. Atmosféra je poté přiváděná do pece při teplotě 910 – 930 °C. Proces probíhá většinou 4 – 6 hodin. Cementace se provádí nejčastěji v pecích typu MONOCARB (viz obr. 4.4 a obr. 4.5), které umožňují ihned po cementaci ocel zakalit [1].



Obr. 4.4 Schéma pece typu MONOCARB [18].



Obr. 4.5 Pec typu MONOCARB [16].

Cementace v plynném prostředí je velice výhodná, v průběhu procesu můžeme regulovat teplotu i aktivní atmosféru. Sycení probíhá rychleji než u cementace v prášku a výsledná kvalita povrchových vrstev je také na výborné úrovni.

4.3.4 Moderní metody cementace

Moderní způsoby cementace jsou v dnešní době hojně využívány a v některých případech zastupují konvenční způsoby. Plazmová a vakuová cementace přináší mnoho výhod a zlepšení, především:

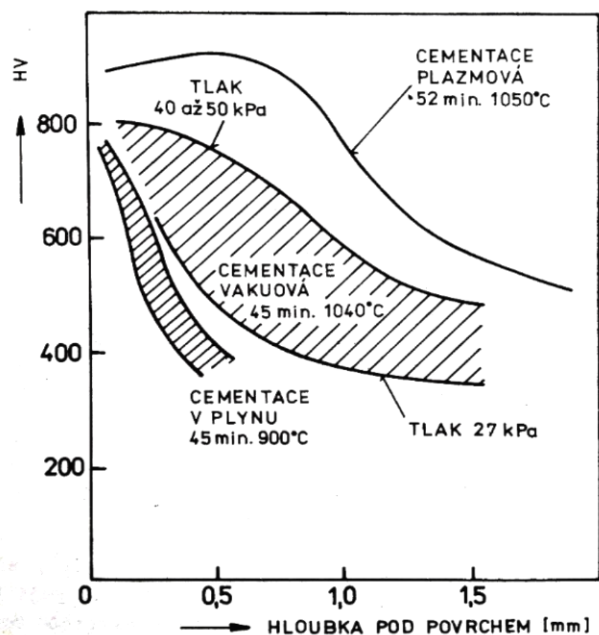
- snížení doby sycení,
- přesnou regulaci procesu pomocí počítače,
- menší deformace po tepelném zpracování,
- cementovaná vrstva dosahuje vysoké jakosti [15].

Vakuová (podtlaková) cementace probíhá ve vakuované peci (viz obr. 4.6). Po dosažení teploty 950 – 1050 °C se přivádí cementační atmosféra o tlaku 7 – 55 kPa, která vzniká rozkladem propanu nebo metanu, podobně jako u cementace v plynném prostředí. Sycení probíhá při vyšších teplotách než u konvenčních způsobů, tudíž se kinetika procesu výrazně zrychlí (probíhá zhruba 45 minut). Na druhou stranu při vyšší teplotě hrozí růst austenitického zrna, což je nežádoucí. Po chemicko-tepelném zpracování je vhodné ocel tepelně zpracovat. Používá se chlazení dusíkem na kalící teplotu a následné kalení, např. do oleje. Tento způsob cementace nám umožňuje dosáhnout vysoké jakosti cementovaného povrchu, jelikož se dílec nachází v ochranné atmosféře a následně je vystaven cementační atmosféře. Nevýhodou je vysoká cena zařízení a komplikované řízení [4, 16].



Obr. 4.6 Jednokomorová vakuová pec [14].

Plazmová (iontová) cementace probíhá při sníženém tlaku metanu (0,1 – 2,7 kPa). Využívá se zde elektrického potenciálu o velikosti napětí až několika set voltů, který působí mezi katodou (dílec) a anodou. Výsledkem procesu je povrch pokrytý plazmovou obálkou vysoké jakosti. Sycení probíhá velmi rychle, přibližně 50 minut. Průběh tvrdosti cementační vrstvy je zobrazen v grafu na obr. 4.7 [4].



Obr. 4.7 Průběh tvrdosti cementační vrstvy po cementaci v plynném prostředí, vakuové cementaci a plazmové cementaci [4].

4.4 Tepelné zpracování po cementaci

Tepelné zpracování cementačních ocelí lze rozdělit na tepelné zpracování před cementací a tepelné zpracování po cementaci. Tepelné zpracování před cementací se provádí kvůli zajištění dobré obrobitelnosti součástí při třískovém obrábění. Oceli po cementaci se především anizotermicky zušlechťují – kalí, popouštějí, normalizačně žihají nebo se žihají naměkko [1].

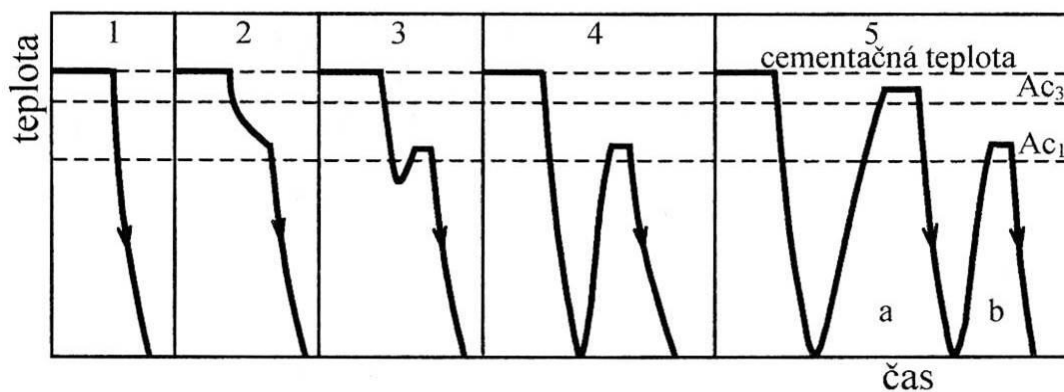
Aby povrch dosáhl konečných vlastností (vysoké tvrdosti a odolnosti proti opotřebení) je nutné po cementaci součást tepelně zpracovat. Existuje několik způsobů tepelného zpracování, které se používají po cementaci:

- kalení z cementační teploty,
- kalení s přichlazením,
- kalení s podchlazením,
- kalení po ochlazení z cementační teploty,
- dvojité kalení [5].

Volba způsobu kalení se odvíjí od toho, jaký typ cementační oceli byl zvolen, jakou metodou cementace byla součást zpracována a jaké jsou její funkce a namáhání.

Kalení přímo z cementační teploty (zhruba 1050 °C) je nejjednodušším způsobem tepelného zpracování. Hrozí však zhrubnutí austenitického zrna vlivem vysokých teplot a vznik vnitřních pnutí a deformací v cementované vrstvě i v jádře součásti. Tímto způsobem se teplotně zpracovávají oceli dědičně jemnozrnné s přídavkem titanu, niobu

a zirkonu, jelikož u nich nehrozí podstatné zhrubnutí austenitického zrna. Po přímém kalení se výsledná struktura skládá z martenzitu a částic sekundárního cementitu. Pro omezení vzniku deformací se u cementačních ocelí používá kalení s přichlazením, přičemž se dílec ochladí na teplotu 750 – 780 °C a následně se kalí, tento způsob však nevede ke zjemnění austenitického zrna. Proto se u běžných cementačních ocelí používá kalení s podchlazením, kdy se součást ochladí na teplotu pod A_{c1} (600 °C) a poté se ohřeje na kalicí teplotu mezi A_{c1} a A_{c3} (840 °C). Ochlazení pod teplotu A_{c1} a následný ohřev na kalicí teplotu vede k překrytalizaci a zjemnění austenitického zrna. Po dvojitém kalení se ve výsledné struktuře cementovaného povrchu nachází jemný martenzit. Při prvním kalení z teploty nad A_{c3} dochází ke zjemnění austenitického zrna a rozpouštění sekundárního cementitu v povrchové vrstvě. Při druhém kalení z teploty nad A_{c1} se získává v povrchové vrstvě již zmiňovaný jemný martenzit. Po jakémkoliv způsobu kalení se musí provést konečné nízkoteplotní popouštění při teplotě 150 – 200 °C po dobu 1 – 2 hodin. Provádí se kvůli snížení vnitřního pnutí a stabilizaci struktury [1, 5].



Obr. 4.8 Způsoby kalení po cementaci: 1 – kalení z cementační teploty, 2 – kalení s přichlazením, 3 – kalení s podchlazením, 4 – kalení po ochlazení z cementační teploty, 5 – dvojitě kalení [13].

4.5 Oceli k cementaci

Cementační oceli se vyznačují nízkým obsahem uhlíku (do 0,25 %) a vysokou houževnatostí. Cementují se především ušlechtilé oceli, uhlíkové (třída 12) nebo slitinové oceli (třída 13 až 16). Volba oceli se odvíjí od požadovaných vlastností povrchové vrstvy a houževnatosti jádra [7].

Uhlíkové cementační oceli se používají na malé, jednoduché a méně namáhané dílce. Nesnáší větší měrné tlaky kvůli nízké houževnatosti. Uhlíkové oceli je výhodné dvojitě kalit, dojde ke zjemnění zrna a zlepšení mechanických vlastností.

Slitinové cementační oceli mají větší prokalitelnost než oceli uhlíkové. Vykazují tedy lepší pevnostní a plastické vlastnosti jádra. Používají se pro výrobu součástí, které jsou namáhány většími měrnými tlaky. Nejčastěji se ze slitinových ocelí používají oceli třídy 14. Základními legujícími prvky jsou chrom a mangan. Díky těmto legujícím prvkům má ocel větší prokalitelnost a vyšší pevnost jádra. Součásti vyrobené z chromových nebo chrommanganových ocelí snáší dobře středně velké tlaky, na druhou

stranu jsou velice citlivé na přehřátí a může u nich docházet ke hrubnutí zrna. Proto vyžadují při kalení patřičnou pozornost. Speciálním příkladem je dědičně jemnozrná ocel 14 223 s přidavkem titanu (0,04 – 0,10 %). U této oceli nedochází ke zhrubnutí zrna ani při vyšších teplotách, tudíž se může cementovat při vyšších teplotách a zkracuje se tak doba nauhličování. Pro nejvíce namáhané dílce jsou využívány oceli chromniklové (třída 16). Tyto oceli mají vysokou prokalitelnost, houževnatost a pevnost jádra (až 1200 MPa). Na druhou stranu jsou chromniklové oceli velmi drahé kvůli deficitnímu niklu, tudíž by jejich použití mělo být pečlivě zváženo [7].

Tab. 4.3 Přehled některých cementačních ocelí a jejich použití [7].

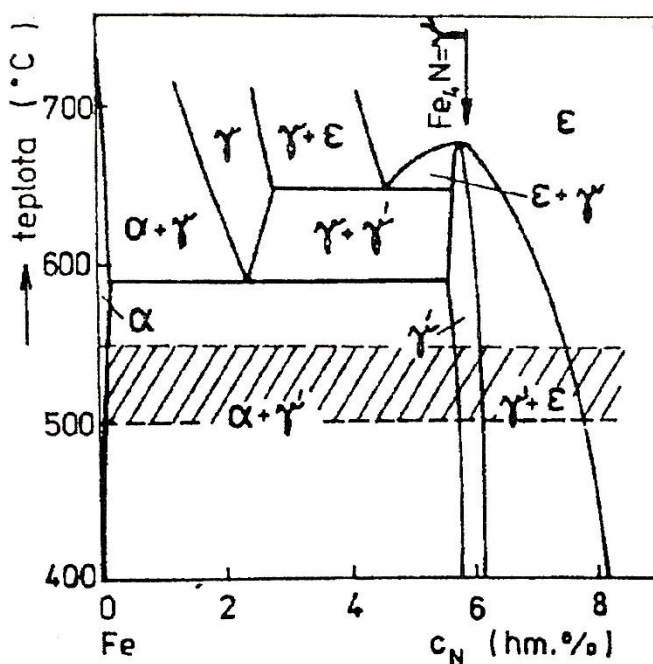
Ocel	Chemické složení [%]				Příklady použití
	C _{max}	Mn _{max}	Cr _{max}	Ni _{max}	
12 010	0,14	0,65	-	-	Méně namáhané součásti, ozubená kola, hřídele, čepy, kladky, řetězová kola
12 020	0,20	0,20	-	-	Součásti motorových vozidel, které jsou méně namáhané, hřídele, větší řetězová kola
12 024	0,24	0,65	-	-	Dílce s větší pevností jádra
14 120	0,18	0,70	1,00	-	Tvrdá cementační vrstva, střední pevnost jádra, výkovky a výlisky, klikové hřídele, ozubená kola, vodítka
14 220	0,19	1,40	1,10	-	Velmi tvrdá cementační vrstva a velká pevnost jádra, Kardanovy kříže, talířová kola aj.
14 223*	0,23	1,10	1,30	-	Tvrký povrch, houževnatost jádra, strojní součásti, čepy, ozubená kola, talířová kola
16 220	0,19	1,00	1,10	1,60	Velmi namáhané součásti, velká pevnost a houževnatost jádra, ozubená kola převodovek, hřídele (drážkované, hnacích kol vozidel), kola diferenciálu
16 420	0,17	0,60	0,90	3,70	Velmi namáhané součásti, velká pevnost a houževnatost jádra, strojní součásti, do kterých se zhotovují otvory, závity, drážky pro klíny atd.
16 720**	0,21	0,55	1,65	4,5	Velmi namáhané dílce, ozubená kola, hřídele apod.

*) mikropřísada do 0,1 hm. % Ti,

***) přísada do 1,2 hm. % W.

5 Nitridace

Nitridování je difuzní sycení povrchu ocelí aktivním dusíkem, který vytváří v povrchové vrstvě tvrdé nitridy. Proces probíhá v rozmezí teplot 500 – 550 °C (podeutektoidní teploty) po dobu až 60 hodin (časově velmi náročný). Nitridovaná vrstva se vyznačuje vysokou povrchovou tvrdostí (1000 – 1200 HV), odolností proti opotřebení, zadírání a únavovému namáhání. Dusík v povrchové vrstvě zvyšuje i korozivzdornost součástí v některých prostředích. Hloubka vrstvy dosahuje 0,2 – 0,6 mm. Při procesu může dojít i ke zvětšení součásti o 6 – 10 μm . Zpravidla se nitridují zušlechitelné oceli s obsahem uhlíku 0,3 – 0,4 hm. %. Nitridace probíhá v plynném a kapalném prostředí. V dnešní době se však nejčastěji používá plazmová (iontová) nitridace, která má značné výhody oproti konvenční nitridaci. Po nitridaci má povrch už své konečné vlastnosti, proto se součásti dále nijak tepelně nezpracovávají. Hlavní výhodou oproti cementaci je, že povrch při vyšších teplotách neztrácí svou tvrdost. Oblast nitridace je vyznačena v rovnovážném diagramu Fe-N na obr. 5.1 [4, 6].



Obr. 5.1 Část rovnovážného diagramu Fe-N (oblast nitridace je šrafována) [5].

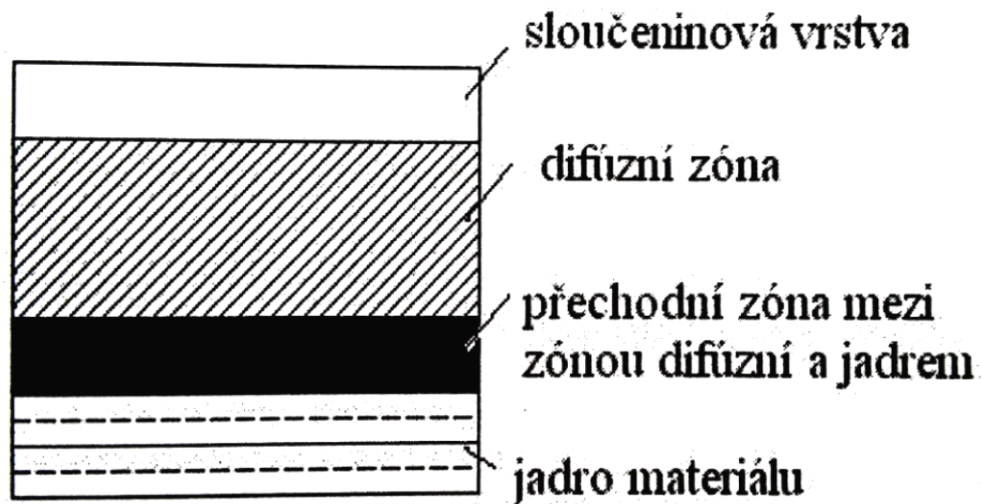
5.1 Struktura nitridované vrstvy

Nitridovaná vrstva většinou obsahuje až 12 hm. % dusíku. Za přítomnosti nitridotvorných prvků (Cr, Al, V) vytváří dusík v povrchové vrstvě speciální nitridy (CrN , Cr_2N , AlN , VN) nebo karbonitridy, proto je struktura vrstvy značně složitá. Povrchová vrstva se skládá z povrchové sloučeninové vrstvy, tzv. bílé vrstvy a difuzní zóny (viz obr. 5.2) [5].

Povrchová sloučeninová vrstva je tvořena většinou ϵ fází, která se skládá z precipitátů Fe_{2-3}N . Tato dílčí vrstva má vyšší odolnost proti korozi v určitých prostředích (voda, vlhká atmosféra, benzín a další), a také vykazuje velmi dobré kluzné

vlastnosti na povrchu. Hloubka vrstvy dosahuje hloubky přibližně 0,01 – 0,05 mm. K vytvoření tohoto typu bílé vrstvy je nutné při nitridaci použít nitridační atmosféru s obsahem uhlíku (přibližně 0,5 % C). Pokud bude použita atmosféra, která neobsahuje žádný uhlík, vytvoří se na povrchu souvislá vrstvička γ' fáze, která se skládá z nitridů železa Fe_4N . Vrstva γ' fáze (Fe_4N) se vyznačuje vysokou tvrdostí a odolností proti opotřebení a je stálá až do teploty 680 °C. Při této teplotě se přeměňuje na již zmíněnou ϵ fázi. Při nitridaci v plynném prostředí mohou vzniknout obě fáze najednou. Tento jev je nevhodný, jelikož fáze mají jinou krystalickou mřížku (ϵ fáze – HCP, γ' fáze - FCC) a může vznikat mezi těmito vrstvami vnitřní pnutí, což umožňuje vznik mikroskopických trhlin na povrchu součásti [2, 4].

Difuzní zóna je tvořena α fází (intersticiální tuhý roztok dusíku ve feritu). V této vrstvě se také nachází precipitáty nitridů, karbonitridů železa a legující prvky. Čím více nitridotvorných prvků se nachází v difuzní zóně, tím více je zóna mělká. Difuzní zóna má vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení a únavě [2].



Obr. 5.2 Struktura nitridované vrstvy [2].

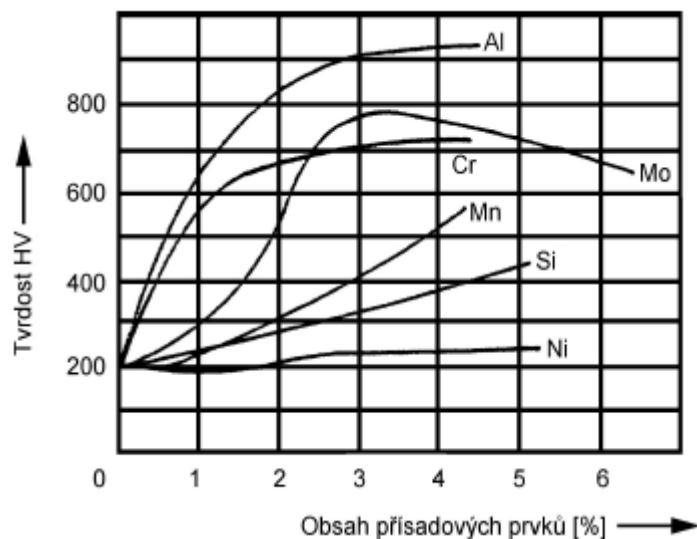
Podle způsobu namáhání a funkce součásti se nitridace provádí tak, aby vzniklo požadované fázové složení povrchové vrstvy (viz tab. 5.1). Fázové složení nitridační vrstvy udává výsledné vlastnosti povrchu součásti [3].

Tab. 5.1 Fázové složení nitridované vrstvy [3].

Charakter namáhání	Obsah legovaných prvků v oceli	Fázové složení bílé vrstvy			Difuzní vrstva
		γ' fáze	ϵ fáze	$\gamma' + \epsilon$	
otěrem	nízký	+	++	Vícefázová vrstva není vhodná	-
	střední	++	+		-
	vysoký	-	-		++
únavou	nízký	+	++		-
	střední	+	+		++
	vysoký	-	-		++
korozí	nízký	-	++		-
	střední	+	++		-
	vysoký	-	+		+

++ velmi vhodné, + vhodné, - nevhodné

Na vlastnosti nitridované vrstvy mají také vliv legující prvky, které se nachází v oceli (viz obr. 5.3). Dusík se nejdříve slučuje s prvky, které mají vyšší afinitu k dusíku. Nejvíce zvyšují tvrdost vrstvy nitridy hliníku a chromu. Hliník ovšem způsobuje i křehkost vrstvy. Pokud je požadováno dosažení vyšší houževnatosti nitridované vrstvy, je vhodné použít ocel s vyšším obsahem molybdenu. Uhlík se v oceli slučuje s karbidotvornými prvky, tudíž zabraňuje vytváření nitridů [3, 11].



Obr. 5.3 Vliv legujících prvků na tvrdost nitridované vrstvy [11].

5.2 Hloubka nitridované vrstvy

Hloubka nitridované vrstvy se určuje pomocí mikroskopického měření na naleptaném mikrovýbruse. Touto metodou lze určit pouze hloubky ϵ fáze a γ' fáze,

kteře jsou viditelné při značném zvětšení. Pro stanovení hloubky α fáze se používá metoda měření mikrotvrdoosti HV 0,5 až HV 0,3. Za účinnou hloubku vrstvy se považuje celá hloubka vrstvy [1].

U strojních součástí se používají hloubky vrstvy 0,2 – 0,6 mm. Hloubka nitridované vrstvy se odvíjí od toho, jak je součást namáhána a jaká je její velikost. Při namáhání na ohyb stačí hloubka vrstvy 0,1 – 0,2 mm. Pokud součást přenáší velké měřné tlaky, doporučuje se volit větší hloubku, zpravidla 0,4 – 0,5 mm. Důležité je si uvědomit, že s rostoucí hloubkou vrstvy klesá vrubová houževnatost, např. u nitridace ozubených kol. Po nitridaci dochází k broušení povrchu dílce, je tedy nutné vzít v potaz i přídavek na obrábění. Broušení je nutné z důvodu dodržení rozměrů součásti. Při nitridaci totiž může docházet i k malému zvětšení rozměrů součásti [1].

Volba hloubky nitridační vrstvy u součástí (hřídele a díry různých průměrů, nebo tloušťka stěny) se určuje dle normy ON 42 0020 (viz tab. 5.2). U ozubených kol se volí hloubka vrstvy podle modulu ozubeného kola (viz tab. 5.3) [10].

Tab. 5.2 Doporučená hloubka nitridované vrstvy u součástí (hodnoty v mm) [10].

Průměr hřídele nebo díry, popřípadě tloušťka stěny	Hloubka nitridované vrstvy
10 – 50	0,2 – 0,4
50 – 200	0,3 – 0,5
200 – 300	0,4 – 0,6
300 – 350	0,5 – 0,7

Tab. 5.3 Doporučená hloubka nitridované vrstvy u ozubených kol (hodnoty v mm) [10].

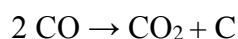
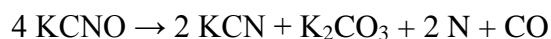
Normální modul m_n	Hloubka nitridované vrstvy
1	0,2 – 0,35
2	0,2 – 0,35
3	0,25 – 0,4
4	0,3 – 0,45
5	0,35 – 0,5
6	0,45 – 0,6
7 a více	0,5 – 0,65

5.3 Způsoby nitridace

Nitridace probíhá v plynných aktivních atmosférách a v solných lázních. Moderní metodou je iontová (plazmová) nitridace, která se uskutečňuje za působení elektrického pole [4].

5.3.1 Nitridace v solných lázních

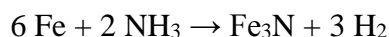
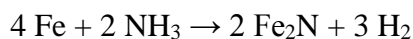
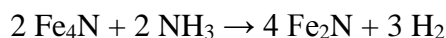
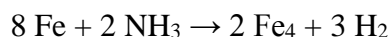
Solné lázně se skládají z roztavených směsí kyanidů a kyanatanů. V průběhu nitridace v solných lázních dochází k termické disociaci kyanatanů a vznikají aktivní atomy dusíku a uhlíku [1]:



Proces nitridace v solných lázních se v dnešní době moc nepoužívá. Mezi její velké nevýhody patří použití jedovatých solí, potřeba likvidace jedovatého odpadu a naleptávání dílce v soli. Kvůli naleptávání součásti v průběhu nitridace je čas pobytu dílce v soli omezen asi na 4 hodiny. Uplatnění nitridace v solných lázních nachází například u řezných nástrojů, kdy se nitriduje pouze 1 – 2 hodiny při teplotě 500 – 570 °C. Díky tomuto procesu mají řezné nástroje vyšší životnost [1].

5.3.2 Nitridace v plynném prostředí

Nitridace v plynném prostředí probíhá při teplotách 500 - 550 °C po dobu až 60 hodin. Proces je tedy velmi pomalý. Jako aktivní atmosféra se používá čpavek, případně směs čpavku a dusíku nebo vodíku (NH_3 , $\text{NH}_3 + \text{N}_2$, $\text{NH}_3 + \text{H}_2$). Při procesu se udržuje vysoký parciální tlak NH_3 , při kterém je aktivita dusíku nejintenzivnější a rychlost růstu difuzní vrstvy nejrychlejší. Nitridace v plynné atmosféře se provádí v plynotěsných zvonových, šachtových nebo komorových pecích. Cílem procesu je vytvoření nitridů v povrchové vrstvě součásti, které zvyšují tvrdost povrchu. Aktivní dusík vzniká štěpením amoniaku při zvýšené teplotě na povrchu součásti, kde vytváří se železem železné nitridy, které jsou nestabilní. Nitridy vznikají těmito reakcemi [1, 2]:



Železné nitridy se na povrchu dílce rozkládají a uvolněný dusík dále difunduje do povrchu součásti. Aktivní dusík, který vzniká rozkladem čpavku přímo v plynné atmosféře (ne na povrchu dílce) nemá žádný význam, jelikož se ihned slučuje do molekuly N_2 . Při rozkladu amoniaku vzniká i vodík, který má nežádoucí vliv na nitridovanou vrstvu. Vodík oduhličuje povrch součásti a způsobuje zkřehnutí nitridační vrstvy. Proto je nutné omezit vliv vodíku na nitridovanou vrstvu snížením jeho parciálního tlaku [2, 3].

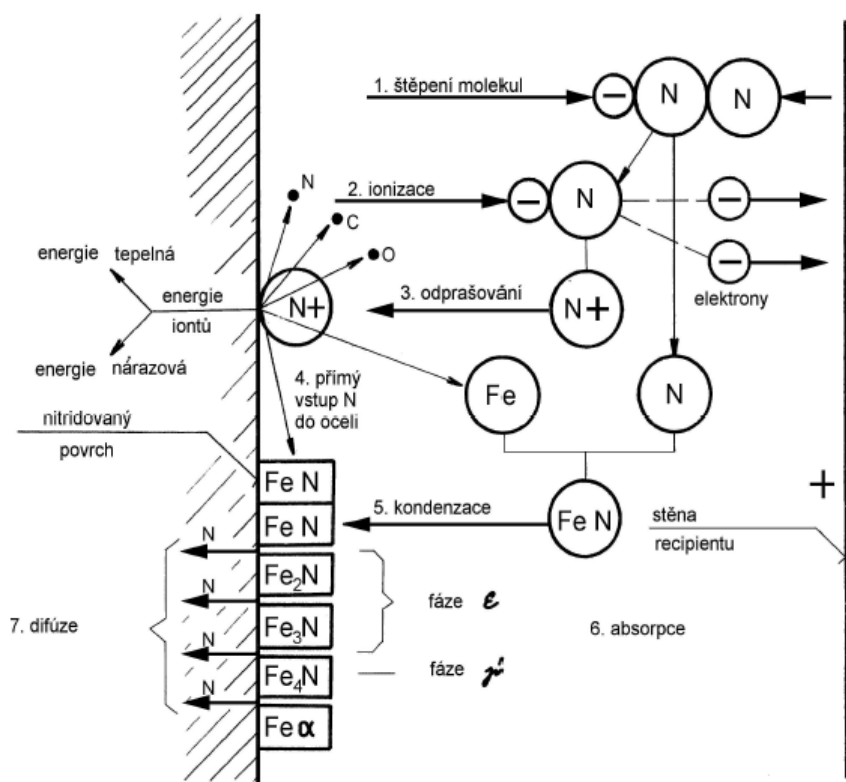
5.3.3 Iontová (plazmová) nitridace

Jedná se o modernější metodu nitridace, která je v dnešní praxi nejvíce využívána. Iontová nitridace probíhá v plynné atmosféře (NH_3 , $\text{NH}_3 + \text{N}_2$, $\text{N}_2 + \text{H}_2$) při sníženém tlaku (0,1 – 1,5 kPa) za působení elektrického pole [4].

Princip iontové nitridace

Dílce jsou vloženy do vakuové nádoby, která se nazývá recipient a jsou zapojeny jako katoda. Vakuová nádoba je zapojena jako anoda. V recipientu se udržuje parciální

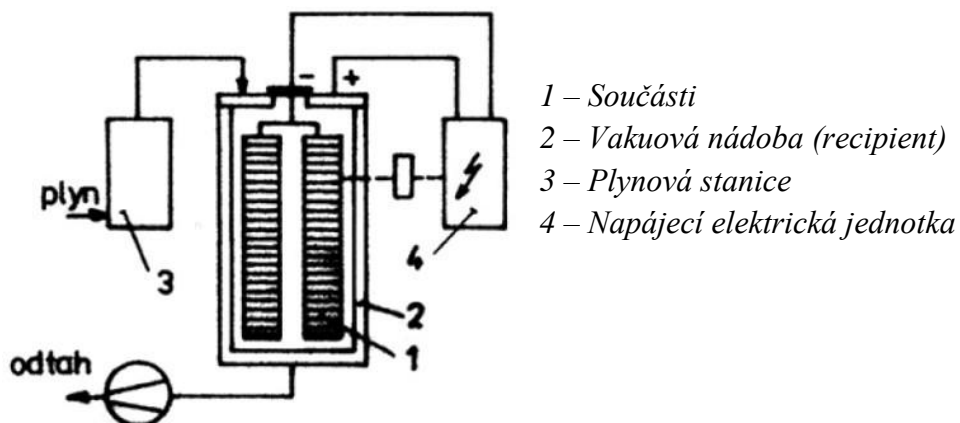
tlak plyné směsi. Následně dochází k připojení na zdroj stejnosměrného napětí o velikosti 400 – 1000 V a mezi anodou (vakuová nádoba) a katodou (povrch dílce) vznikne elektrické pole. Následně dochází k ionizaci a štěpení plyné atmosféry. Kladné ionty jsou elektrickým polem urychlovány a dopadají na katodu (povrch součásti). Tyto částice mají velkou kinetickou energii, která se při dopadu mění na teplo a dochází k ohřívání součásti. Současně dochází i k vyrážení atomů železa a dalších prvků z povrchu dílce vlivem dopadajících iontů. Tento jev je často nazýván jako odprašování. Reakcí dusíku s odprašovanými prvky vznikají nitridy, které dále kondenzují a vytváří na povrchu souvislou vrstvu nitridů (viz obr. 5.4) [3,4].



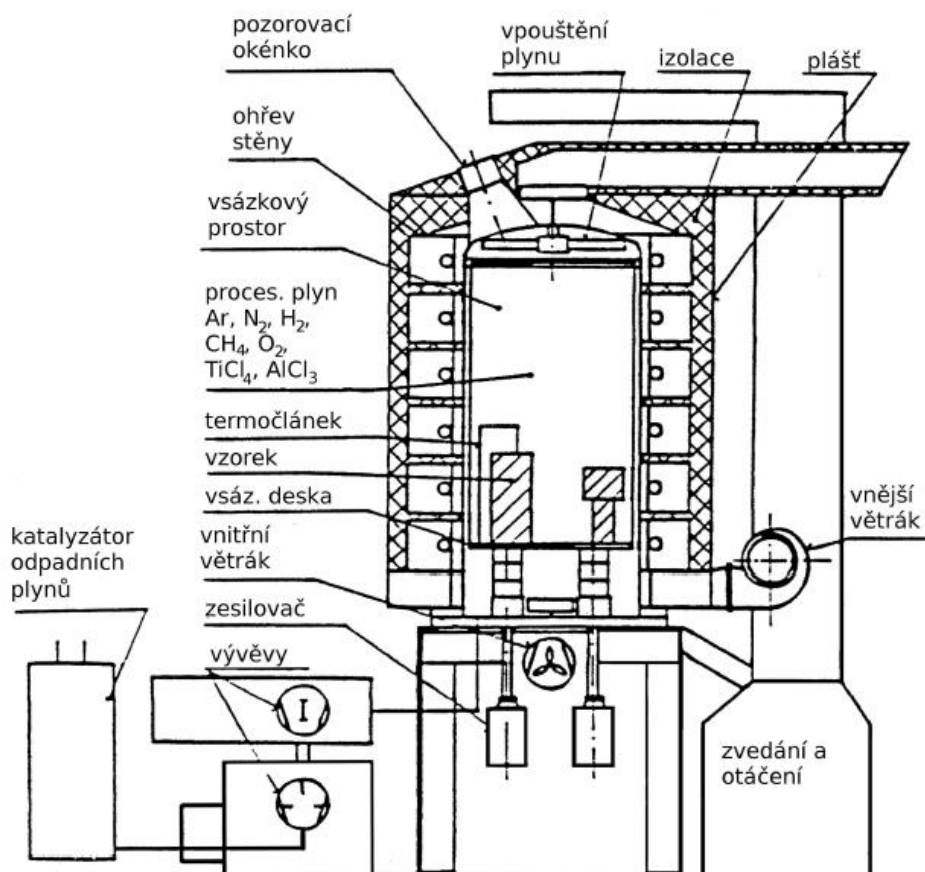
Obr. 5.4 Schéma dějů při iontové nitridaci [4].

Zařízení pro iontovou nitridaci

Iontová nitridace probíhá v tzv. iontonitridačních jednotkách (viz obr. 5.5), které se skládají z vakuové nádoby (recipient), vakuového systému, napájecí elektrické jednotky, elektronické řídicí jednotky a plynové stanice. Vakuová nádoba slouží k uložení součásti, k ní je připojen vakuový systém, který má za úkol odčerpání vzduchu z prostoru recipientu. Napájecí elektrická jednotka slouží jako zdroj stejnosměrného proudu. Řídicí jednotka zabezpečuje podmínky a průběh iontové nitridace. Plynová stanice připravuje nitridační atmosféru a dodává ji do prostoru vakuové nádoby. Iontonitridační jednotky jsou v dnešní době už plně automatizované a musí splňovat určité podmínky, aby došlo k silnoproudému doutnavému výboji v recipientu a vytvoření nitridační vrstvy o požadovaných vlastnostech [3].



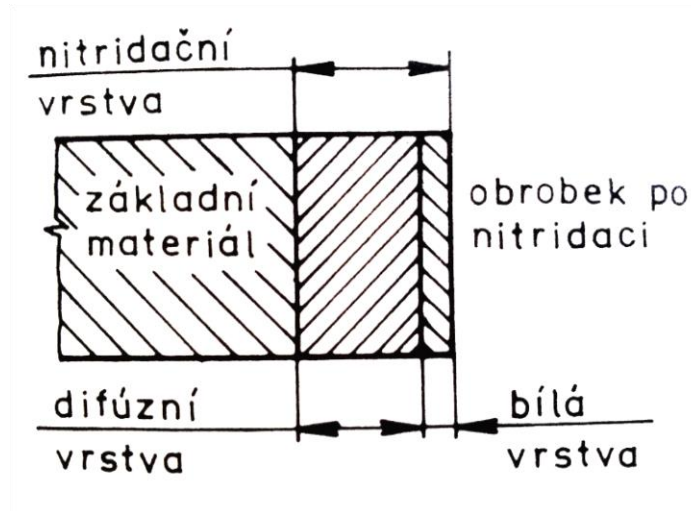
Obr. 5.5 Schéma iontonitridační jednotky [13].



Obr. 5.6 Schéma zařízení pro iontovou nitridaci [17].

Nitridovaná vrstva po iontové nitridaci nemá vždy stejné složení a odvíjí se od použití nitridačního plynu nitridované oceli. Pokud je povrch součásti vystaven plynu, který neobsahuje žádný uhlík, na povrchu se vytvoří slabá tzv. bílá vrstva. Ta je tvořena nitridem železa Fe₄N s krychlovou mřížkou, plošně středěnou (γ' fáze). Bílá vrstva má hloubku jen několik desítek milimetrů, ale na druhou stranu vykazuje vysokou tvrdost (až 1300 HV) a odolnost proti opotřebení. Při vystavení povrchu součásti plynu,

který obsahuje uhlík (ve formě metanu), vytvoří se na povrchu vrstva ϵ fáze, která se skládá z nitridu železa $Fe_{2-3}N$. Tato vrstva se vyznačuje velice dobrými antikorozními vlastnostmi a má vyšší odolnost proti zadírání. Složení nitridační vrstvy je popsáno na obr. 5.7 [3, 4].



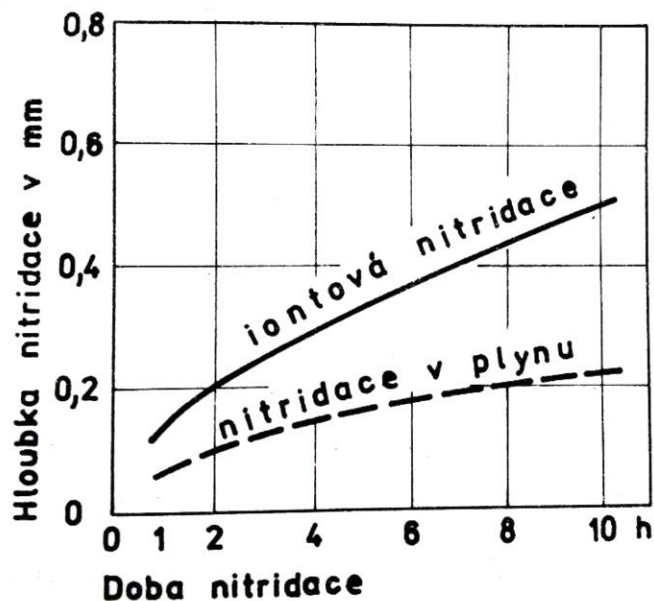
Obr. 5.7 Složení nitridační vrstvy [4].

Po plazmové nitridaci má povrch vysokou tvrdost, odolnost proti opotřebení a teple (za provozu ve vyšších teplotách), odolnost proti určitým prostředím (přehřátá pára, mořská voda atd.), odolnost proti zadírání a vyšší mez únavy. Povrchová vrstva nevykazuje citlivost vůči vrubům, které jsou koncentrátorem napětí. Iontovou nitridaci lze rozdělit na tři skupiny podle jejich účelu použití [3]:

- nitridace pro zvýšení tvrdosti,
- nitridace pro zvýšení meze únavy oceli,
- nitridace jako ochrana proti korozi.

Velkou předností iontové nitridace je možnost změny struktury vrstvy, a tím i její vlastnosti. Pro zvýšení meze únavy je důležitá jen tloušťka a tvrdost difúzní vrstvy, tedy α fáze. Zvýšení korozivzdornosti lze dosáhnout zvýšením tloušťky tzv. bílé vrstvy (γ' fáze) [3].

Oproti klasickým způsobům nitridace má iontová nitridace značné výhody. Nitridovaná vrstva se vytváří rychleji, což umožňuje dvojnásobné až pětinasobné zkrácení doby nitridace. Povrchová vrstva po iontové nitridaci dosahuje vyšší jakosti a tvrdosti než je běžné u klasických metod nitridace (viz obr. 5.8). Velkou výhodou je možnost ovlivnění struktury povrchové vrstvy. Jedná se o ekologický proces bez znečištění a odpadů. Další výhodou jsou nižší náklady na zpracování. Na druhou stranu je tento proces technologicky náročný a je nutné dodržovat přísná pravidla [1, 4].



Obr. 5.8 Porovnání růstu nitridační vrstvy [3].

5.4 Oceli k nitridaci

Nitridační oceli tvoří podle normy svou skupinu ocelí, avšak svým složením jsou podobné ocelím k zušlechťování. Nejčastějšími legujícími prvky těchto ocelí jsou hliník, chrom, vanad a molybden. Tyto prvky tvoří s dusíkem v povrchu tvrdé nitridy. Nitridovat lze však celou škálu ocelí. Na tvrdost povrchové vrstvy mají velký vliv legující prvky ve zvolené oceli [7].

Oceli pro nitridaci je nutné rozdělit do skupin podle legujících prvků [4]:

- nelegované oceli – uhlíkové a manganové oceli (oceli třídy 11 a 12),
- nízkolegované oceli – oceli třídy 13,
- středně a vysokolegované oceli – oceli třídy 14 a 15,
- oceli třídy 16,
- oceli třídy 17.

Nelegované oceli (třídy 11 a 12) se zpravidla nitridují při teplotě 550 – 580 °C po dobu delší než 20 hodin. Výsledná difuzní vrstva má hloubku 0,6 – 1,1 mm a dosahuje tvrdosti až 700 HV. U těchto ocelí převládá vrstva ϵ fáze, která se vytváří přidáním metanu do plynné atmosféry [4].

Nitridované nízkolegované oceli (třídy 13) se používají u středně namáhaných součástí. Jejich hlavní výhodou je nízká cena. Oproti nelegovaným ocelím vykazují vyšší tvrdost nitridační vrstvy. Zvýšení tvrdosti je přisuzováno přítomností vanadu v oceli, který s dusíkem vytváří nitridy v povrchové vrstvě. Typickým zástupcem této skupiny

ocelí je ocel 13 242, která je otěruvzdorná a dobře snáší i kontaktní namáhání. Tato ocel se doporučuje pro nitridovaná ozubená kola do modulu 6 [4].

Z vysokolegovaných ocelí se pro nitridaci používají oceli typu MnCr, CrV a CrMoV třídy 14 a 15. Tyto oceli mají dostatek obsahu chromu, který vytváří v povrchové vrstvě společně s dusíkem tvrdé nitridy. Nitridační vrstva těchto ocelí dosahuje vysokých hodnot tvrdosti. Oceli snáší větší měrné tlaky a únavové namáhání [3].

Oceli třídy 16 typu CrNi a CrNiMo nejsou pro nitridaci příliš vhodné. Přesto nachází své uplatnění u součástí, které jsou vysoce namáhány. Nitridační vrstvy u těchto ocelí nemají vysokou tvrdost, ale dosahují velké hloubky a jsou plastičtější. Používají se u vysoce namáhaných klikových hřídelí, torzních tyčí atd. [3].

Oceli třídy 17 se nitridují pouze za cílem zvýšení tvrdosti. Nitridační vrstva má malou hloubku a nesnáší kontaktní zatížení. Na druhou stranu vykazuje vysokou odolnost proti opotřebení a zadírání. Nevýhodou nitridace nerezových ocelí je, že snižuje korozivzdornost povrchu [3].

Nitridují se i nástrojové oceli. Nitridační vrstva u rychlořezných ocelí dosahuje hloubky pouze 0,1 mm a vyznačuje se vysokou tvrdostí. Oceli pro nástroje, které pracují za tepla, se nitridují v kaleném stavu. Nitridaci podstupují např. lisovací trny, matrice, kovací zápustky atd. Oceli pro nástroje pracující za tepla jsou vystaveny vysokým tlakům a otěru. Nitridace těchto ocelí přináší zvýšení životnosti nástrojů [4].

Vlastnosti nitridační vrstvy a způsoby iontové nitridace u vybraných ocelí je popsáno v tab. 5.4.

Tab. 5.4 Přehled vybraných ocelí a způsobů iontové nitridace [3].

Ocel	Nitridační parametry				Tvrdost		Mikrotvrdost HV 0,05	Tloušťka nitridační vrstvy (mm)
	Teplota (°C)	Čas (hod)	Napětí (V)	Tlak (Pa)	HV 10	HV 30		
13 123	510	42	530	280	652	627	850	0,55
14 140	510	16	710	280	491	368	700	0,5
14 220	530	24	758	150	736	643	1240	0,65
14 340	530	24	758	150	1331	1018	1410	0,3
15 230	515	72	550	240	891	807	1200	0,45
15 241	515	72	550	240	811	774	1120	0,4
15 260	480	20	700	280	503	502	720	0,4
15 340	500	20	700	310	988	763	1400	0,4
17 023	550	10,5	700	310	880	550	1350	0,15

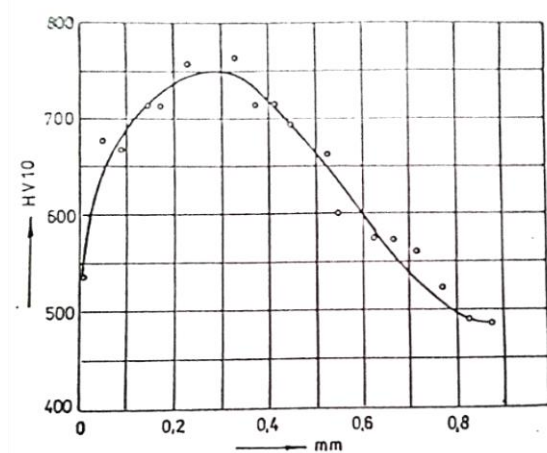
6 Přehled metod chemicko-tepelného zpracování ocelí

6.1 Nitrocementace a karbonitridace

Při karbonitridaci i nitrocementaci dochází k difuznímu sycení povrchu současně dusíkem a uhlíkem. Liší se pouze teploty, při kterých procesy probíhají. To má za následek rozdílné koncentrace dusíku a uhlíku v difuzní vrstvě a odlišné vlastnosti povrchové vrstvy [5].

Nitrocementace probíhá obvykle při teplotách 840 °C až 860 °C (okolo teploty A_{C3}) v plynném nebo kapalném prostředí. K vytvoření plynné nitrocementační atmosféry se používají směsi uhlovodíků, např. anilínu ($C_6H_5NH_2$), pyridinu (C_5H_5N) nebo amoniaku (NH_3). V této atmosféře se nitrocementuje přibližně 1 – 2 hodiny a hloubka difuzní vrstvy dosahuje 0,3 až 0,4 mm. V kapalném prostředí probíhá nitrocementace přibližně jednu hodinu a hloubka vrstvy dosahuje 0,2 mm. Při procesu se využívají tzv. kapalné lázně. Jedná se o solné lázně s přísadou kyanidů (KCN , $NaCN$) a neutrálních složek – chloridů nebo uhličitánů. Proces je také někdy nazýván kyanováním. Oceli po nitrocementování se musí tepelně zpracovávat, kalí se a popouštějí zhruba 1 – 2 hodiny při teplotě 180 °C [1, 5].

Nitrocementace má oproti cementaci značné výhody. Přítomnost dusíku v aktivní atmosféře urychluje difuzi uhlíku, probíhá při nižších teplotách, a tím způsobuje menší deformace a omezuje hrubnutí austenitického zrna. Proto je možné kalit ihned po skončení nitrocementace. Difuzní vrstva se skládá z martenzitu, zbytkového austenitu a karbonitridů. Vykazuje menší tvrdost (cca 700 – 800 HV) než u cementace, kvůli většímu množství zbytkového austenitu. Na druhou stranu jádro má vyšší pevnost (1700 – 2000 MPa) kvůli vyššímu obsahu uhlíku v oceli (oceli s vysokou pevností). Přítomnost dusíku v difuzní vrstvě zvyšuje stabilitu austenitu. Nitrocementační vrstva je plastičtější, má vyšší rázovou houževnatost a únavovou pevnost než cementační vrstva. Průběh tvrdosti nitrocementační vrstvy je zobrazen v grafu na obr. 6.1 [1, 2].



Obr. 6.1 Průběh tvrdosti HV nitrocementační vrstvy [1].

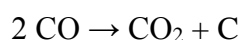
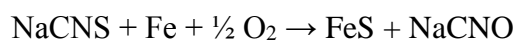
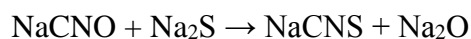
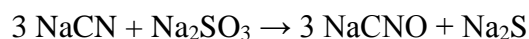
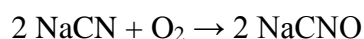
Oceli pro nitrocementování mají většinou obsah uhlíku 0,25 – 0,4 hm. %. Používají se cementační oceli, nelegované oceli, nízkolegované oceli nebo oceli s vysokou pevností jádra. Dá se říct, že v některých oblastech výroby nitrocementace nahrazuje cementaci. Probíhá při nižších teplotách a kratší dobu, je tedy ekonomičtější. Na druhou stranu její technologičnost může být náročnější, pokud bude docházet v průběhu procesu k regulaci složení atmosféry. Nitrocementují se i silně namáhané součásti, např. ozubená kola, hřídele převodovek a další [4, 5].

Karbonitridace se provádí při teplotách 560 – 630 °C (pod A_{C1}) v plynném a kapalném prostředí po dobu zhruba 4 hodin. Má podobný průběh jako nitridace, akorát probíhá kratší dobu. Plynná atmosféra se vyznačuje směsí amoniaku a uhlovodíků jako u nitrocementace. Kapalném prostředí se opět skládá ze solné lázně, která je tvořena kyanidy (KCN, NaCN) a neutrálními složkami (chloridy, uhličitany). Výsledkem procesu je vytvoření souvislé vrstvy ϵ fáze na povrchu dílce, která se vyznačuje vysokou tvrdostí (až 1000 HV), vynikajícími kluznými vlastnostmi a odolností proti zadírání. Dosahuje hloubky cca do 0,05 mm [5].

Karbonitridované oceli se dále nijak tepelně nezpracovávají, tudíž je u nich menší deformace povrchu než u nitrocementace. Většinou se tímto procesem zpracovávají součásti, které musí mít vysokou odolnost proti zadírání, např. řezné nástroje, nástroje na protlačování nebo lisovací nástroje. [5].

6.2 Sulfonitridace

Sulfonitridace je jednou z metod chemicko-tepelného zpracování, kdy dochází k syčení povrchu více prvky. V případě sulfonitridace to jsou dusík a síra. Plynné prostředí se skládá ze směsi amoniaku a sirovodíku (98 % NH_3 + 2 % H_2S). K nasycování dochází při teplotách 580 až 610 °C po dobu 2 – 3 hodin. Při ohřevu na nasycovací teplotu se používá pouze atmosféra složená z amoniaku a po dosažení této teploty se přivádí do pece sulfonitridační atmosféra. Při sulfonitridaci v solných lázních se využívá roztavených solí kyanidů, kyanatanů a siřičitanu sodného (Na_2SO_3) s přídavkem uhlíku, dusíku, kyslíku a síry. Proces probíhá při teplotách 560 – 590 °C po dobu 30 minut až 3 hodin, zpravidla to bývá 1 hodina. Chemické reakce probíhající při sulfonitridaci v solných lázních lze napsat následujícím způsobem [1]:



Difuzní vrstva, která vznikne, má podobné vlastnosti jako vrstva vzniklá po nitridaci, s tím rozdílem, že se v ϵ fází nachází i síra v podobě FeS. Povrchová vrstva

má vynikající kluzné vlastnosti i při špatném mazání, vysokou odolnost proti zadírání, otěru a opotřebení a dosahuje hloubky 10^{-3} až 10^{-2} mm. Zajímavostí je, že povrch si své kluzné vlastnosti zachovává i po vysokém opotřebení, kdy dochází ke ztrátě sulfonitridované vrstvy. To je způsobeno třecím ohřevem, který povrch zahřeje na vysoké teploty a síra difunduje směrem k jádru a zůstává v povrchu součásti [1, 5].

Sulfonitridovaný povrch nachází své využití v mnoha odvětvích strojního průmyslu. Používá se např. u kluzných pouzder, řezacích nástrojů nebo pístních kroužků spalovacích benzínových motorů. Po sulfonitridování se povrch nijak tepelně nezpracovává [4].

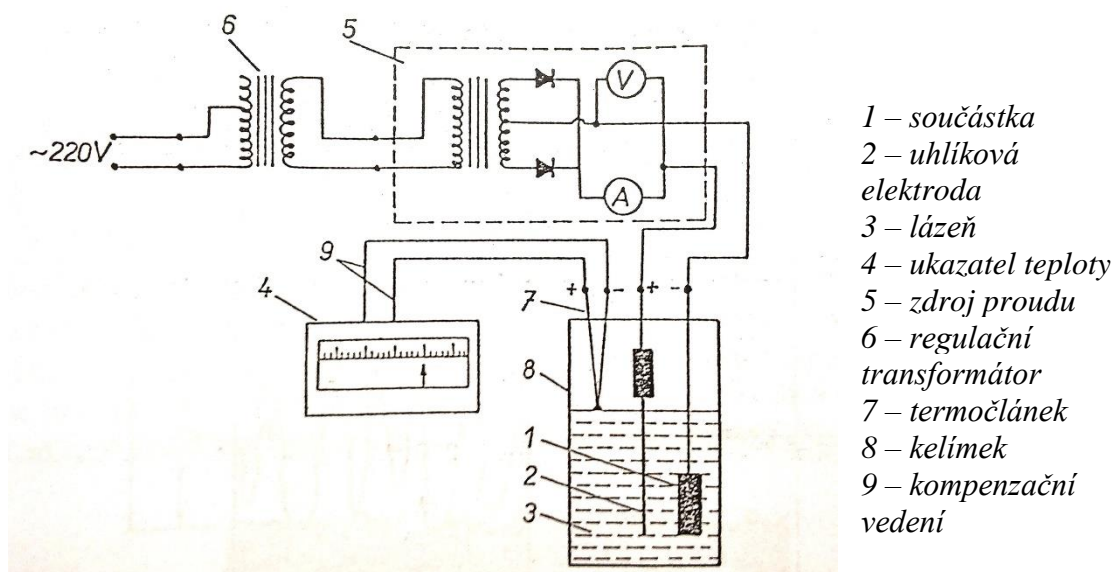
6.3 Boridování

Při boridování dochází k nasycování povrchu oceli borem. Proces se uskutečňuje při teplotách 800 až 1050 °C po dobu 3 – 6 hodin. Boridovat můžeme v práškových směsích, které se skládají z 60 % amorfního boru, karbidu boru nebo feroboru, 2 – 4 % NH_4Cl a oxidu hlinitého. Dále se boriduje v plynných směsích $\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$ nebo $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$. Nevýhodou těchto plynných směsí je jejich výbušnost, pokud se smísí se vzduchem. Nejčastěji se však používá boridování v solných koupelích při působení elektrolýzy [2].

Boridování v solných koupelích za působení elektrolýzy je nejefektivnější způsob a zajišťuje optimální kvalitu boridované vrstvy. Díky elektrolýze probíhá nasycování povrchu až o 25 % rychleji. Při této metodě se využívá boraxu ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7$), který se redukuje sodíkem a vzniká aktivní bor v podobě B_2O_3 . Průběh boridování v solných koupelích za působení elektrolýzy lze popsat následujícím způsobem [1]:

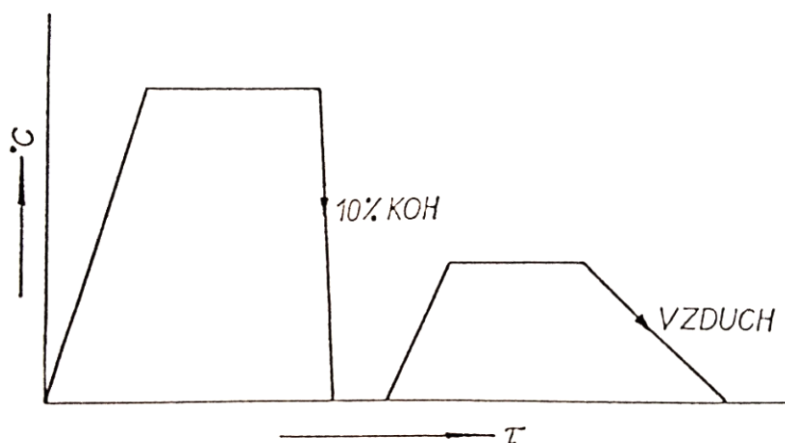
1. Termická disociace: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightarrow \text{Na}_2 + 2 \text{B}_2\text{O}_3$
2. Elektrolytická disociace: $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \rightarrow 2 \text{Na}^+ + \text{B}_4\text{O}_7^{2-}$
3. Ionty Na^+ získávají na katodě chybějící elektron a mění se v atomy:
 $\text{Na}^+ + e \rightarrow \text{Na}$
4. Sodík redukuje bor z oxidu boritého: $6 \text{Na} + \text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 3 \text{Na}_2\text{O} + 2 \text{B}$
5. Vylučování iontů boru na katodě: $\text{B}^{3+} + 3e \rightarrow \text{B}$
6. Vylučování iontů kyslíku na anodě: $\text{O}^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} \text{O}_2 + 2e$

Při elektrolytickém boridování je součást připojená na zdroj stejnosměrného proudu o napětí 6 – 24 V jako katoda, anodou je grafitová elektroda ponořená do lázně. Hustota proudu, který dopadá na součást, bývá 0,2 až $0,24 \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Nasycování probíhá při teplotách 900 – 950 °C po dobu 2 – 4 hodin. Zařízení pro elektrolytické boridování je popsáno ve schématu na obr. 6.2 [1].



Obr. 6.2 Schéma zařízení pro elektrolytické boridování [1].

Povrch dílce po elektrolytickém boridování je pokrytý hustou vrstvou usazenin ze solné lázně, proto je nutné součást tepelně zpracovat. Nejúčinnější je zbavit povrch usazenin přehozením polarity dílce posledních 5 – 30 minut při boridování a kalit bezprostředně do vodního roztoku KOH nebo NaOH. Nakonec je možné součást popouštět na požadovanou hodnotu pevnosti jádra (viz obr. 6.3) [1].



Obr. 6.3 Schéma tepelného zpracování po boridování [1].

Boridovaná vrstva vykazuje vysokou tvrdost při vyšších teplotách (až 2000 HV při teplotě 900 – 950 °C), odolnost proti otěru a opotřebení a zvýšenou žáruvzdornost. Hloubka difuzní vrstvy je 0,1 až 0,3 mm. Směrem od povrchu k jádru se v boridovaném povrchu nachází souvislá vrstva boridů FeB, Fe₂B a tuhého roztoku boru v železe α. Zvláštností je, že bor v mřížce BCC (mřížka tělesově středěná) vytváří

substituční tuhý roztok v železe α a naopak v mřížce FCC (mřížka plošně středěná) vytváří intersticiální tuhý roztok v železe γ . Tento jev lze vysvětlit tím, že bor má velikost atomu někde na rozhraní mezi prvky, které vytváří intersticiální tuhé roztoky a mají menší atomy (H, C, N) a prvky, které vytváří substituční tuhé roztoky v mřížce železa [1, 2].

Tento způsob chemicko-tepelného zpracování se používá především u součástí pracujících při vyšších teplotách, které nahrazují nitridované a cementované součásti. Bórovat můžeme i součásti, které jsou namáhány na otěr, např. textilní stroje [4].

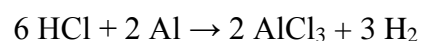
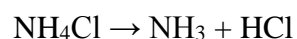
6.4 Difuzní křemíkování

Difuzní křemíkování je proces, při kterém dochází k nasycování povrchu součásti křemíkem na 13 – 15 % Si v železe α . Hloubka vrstvy dosahuje 0,3 – 1 mm. Dílce, které jsou difuzně křemíkovány, dosahují vysoké odolnosti proti korozi v mořské vodě a odolávají i působení silných kyselin, jako jsou H_2SO_4 , HCl a HNO_3 . Povrch má také vysokou odolnost proti oxidaci ve vyšších teplotách. Tvrdost vrstvy není vysoká, dosahuje zhruba 200 – 250 HV. Vrstva je velmi porézní, proto dochází k nasycování vrstvy olejem. Uhlík působí na difuzi křemíku negativně, zpomaluje difuzi křemíku. Proto se pro křemíkování volí většinou nízkouhlíkové oceli [1, 2].

Oceli můžeme difuzně křemíkovat v plynných nebo práškových směsích, při teplotách 800 – 1100 °C po dobu 4 – 12 hodin. Jako prášková směs se používá ferosilicium, které má obsah křemíku až 90 %, šamot a NH_4Cl . Dílce se zásypem se ukládají do plynotěsných krabic a po provedení křemíkování se pomalu ochlazují na teplotu 100 – 200 °C. V plynné atmosféře se dílec zasype ferosiliciem a ohřívá se na teplotu sycení. Po dosažení této teploty se přivádí do pece Cl_2 nebo HCl [1].

6.5 Alitování (difuzní hliníkování)

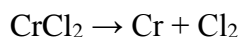
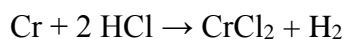
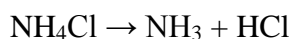
Jedná se o proces, při němž dochází k difuznímu sycení povrchu oceli hliníkem. Povrch dílce po alitování vykazuje vysokou žáruvzdornost a odolnost proti opotřebení, ale má nízkou tvrdost (400 HV). Hloubka difuzní vrstvy po alitování je přibližně 0,02 – 0,8 mm a obsahuje 32 – 34 % hliníku. Alitují se především oceli nízkouhlíkové, žáruvzdorné a žárupevné. Alitování probíhá v rozmezí teplot 700 – 1100 °C po dobu 30 minut až 6 hodin. Provádí se v práškových směsích, které obsahují aktivní složku (hliníkový prášek nebo ferroaluminium), oxid hlinitý a NH_4Cl . V práškové směsi při vysokých teplotách probíhají následující chemické reakce [1, 2]:



V praxi se také používá kombinace alitování a aluemetování. Princip této metody je velice jednoduchý. Na čistý povrch dílce (po otryskání a difuzním žíhání) se nastříká vrstva 0,7 – 1,2 mm hliníku a následně se dílec vloží do pece a ohřívá se na teplotu 900 – 1000 °C po dobu 2 – 4 hodin. Po této době se dílec ochlazuje na teplotu 600 °C a potom se ochlazuje na vzduchu. Hloubka difuzní vrstvy po tomhle zpracování dosahuje 0,2 – 0,4 mm. Kombinace alitování a aluemetování je rychlá a poměrně levná metoda [2, 4].

6.6 Difuzní chromování

Při této metodě chemicko-tepelného zpracování dochází k sycení povrchu součásti chromem. Chromují se většinou nízkouhlíkové a austenitické oceli. Proces probíhá při teplotách 900 – 1200 °C po dobu 6 – 12 hodin. Chromování se provádí v práškových směsích, plynech i solných lázních. V práškových směsích se používají směsi ferochromu nebo kovového chromu, kaolínu a chloridu amonného (NH₄Cl). Dílce se umístí do plynotěsných krabic a zasypou se směsí, následně probíhají tyto chemické reakce [1, 2]:



Při difuzním chromování v plynu jsou součásti a prášková směs od sebe odděleny. Přes zahřátou směs se přivádí H₂ nebo HCl, které unášejí aktivní molekuly CrCl₂ na povrch součásti. Solné lázně, ve kterých probíhá chromování, se skládají z BaCl₂, MgCl₂ nebo CaCl₂ a 10 – 20 % CrCl₂. Nad povrch lázně se přivádí vodík. U všech těchto metod difuzního chromování se využívá aktivních molekul halogenidů (boridy, chloridy, fluoridy a jodidy chrom) [1].

Difuzní vrstva má vysokou žáruvzdornost, korozivzdornost, ořuvzdornost a dosahuje hloubky 0,08 – 0,2 mm. Na povrchu se vytvoří vrstva karbidů chromu, pod touto vrstvou se nachází vrstva α fáze, tedy tuhého roztoku Cr v železe α (obsah Cr je 10 – 13 %). V praxi se většinou touto metodou zpracovávají kalibry, matrice a součásti namáhané třením [1, 4].

7 Závěr

Chemicko-tepelné zpracování se řadí mezi povrchové úpravy materiálů. Při procesu dochází ke změně chemického složení povrchových vrstev materiálů. Provádí se především za účelem zvýšení tvrdosti, odolnosti proti opotřebení, otěru a únavě. Některé metody chemicko-tepelného zpracování mohou zvyšovat i antikorozi vlastnosti povrchu součástí. Tyto vlastnosti nám umožňují zvýšení životnosti nelegovaných nebo nízkolegovaných ocelí. V praxi jsou nejvíce využívány metody cementace a nitridace.

Při cementaci dochází k difuznímu sycení povrchu oceli uhlíkem, což má za následek zvýšení tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a únavovému namáhání. Nejčastěji se cementuje v plynném prostředí, případně v plynném prostředí se sníženým tlakem. Konečných vlastností povrchu oceli se dosahuje tepelným zpracováním po cementaci. Není vhodné cementovat oceli, které jsou zatěžovány při vyšších teplotách, protože při 200 °C ztrácí povrchová vrstva svou tvrdost. Mezi oceli vhodné k cementaci se řadí nízkouhlíkové oceli (do 0,25 hm. %). Jedná se především o oceli třídy 12, 14 a 16. V praxi se cementují nejčastěji ozubená kola, hřídele, čepy, kladky, řetězová kola, talířová kola, kola diferenciálu apod.

Nitridace je proces, kdy dochází k sycení povrchu oceli dusíkem. Proces probíhá při nižších teplotách než u cementace a je zdoluhavý. V dnešní době se nejvíce uplatňuje nitridace v regulovatelných plynných atmosférách a plazmová nitridace. Výsledkem je vysoká povrchová tvrdost, odolnost proti opotřebení, únavě a korozi. Povrch si zachovává svou vysokou tvrdost i při vyšších teplotách. Největší výhodou je možnost ovlivnění struktury a vlastností povrchu pomocí regulace atmosféry. Je možné nitridovat pestrou škálu ocelí (oceli třídy 12 – 17). V současné době se nitridují všechny možné součásti a dílce – ozubená kola, klikové hřídele, řezné nástroje, nástroje pro tváření, šrouby, čepy, hřídele, součásti pracující ve vyšších teplotách a další.

Při nitrocementaci a karbonitridaci dochází k sycení povrchu dusíkem a zároveň uhlíkem. Oproti cementaci tato metoda probíhá rychleji (dusík urychluje difuzi uhlíku) a při nižších teplotách. Tímto způsobem se zpracovávají ozubená kola, hřídele, nástroje pro tváření atd. Sulfonitridované povrchy se používají u součástí, které musí mít vysokou odolnost proti zadírání a dobré kluzné vlastnosti. Jedná se především o kluzná pouzdra, řezací nástroje nebo pístní kroužky spalovacích benzínových motorů. Boridovaný povrch součástí se vyznačuje vysokou tvrdostí (až 2000 HV) a žáruvzdorností. Nachází své uplatnění například u součástí pracujících za velmi vysokých teplot. Dílce, které jsou vystaveny agresivnímu prostředí (mořská voda, kyseliny) je vhodné difuzně křemíkovat, vrstva vykazuje vysokou odolnost proti korozi. Alitování je proces sycení povrchu hliníkem. Alitované součásti mají vysokou žáruvzdornost a žárupevnost, ale nízkou tvrdost. Matrice, kalibry a součásti namáhané třením se difuzně chromují. Vrstva má vysokou odolnost proti otěru a korozi. Chromují se většinou nízkouhlíkové a austenitické oceli.

Seznam použité literatury

- [1] ZÁBAVNÍK, Viktor. Chemicko - tepelné spracovanie kovov. Košice: Technická univerzita, 141 s.
- [2] MICHNA, Štefan, Jarmila TRPČEVSKÁ a Iva NOVÁ. Strojírenská technologie. 1. vyd. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, 2012, 337 s. ISBN 978-80-7414-501-8.
- [3] HOLEMÁŘ, Alois a Vojtěch HRUBÝ. Iontová nitridace v praxi. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1989, 242 s. Redakce strojírenské a metalurgické literatury. ISBN 80-030-0001-7.
- [4] HRUBÝ, Vojtěch a Alois HOLEMÁŘ. *Katalog technologických listů iontové nitridace*. Brno: STROJTECH, 1991, 229 s.
- [5] PTÁČEK, Luděk. Nauka o materiálu II. Brno: CERM, c1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [6] SMÓLING, Kálmán. Tepelné a chemicko-tepelné spracovanie v príkladoch. 1. vyd. Bratislava: Alfa, 1989, 383 s.
- [7] DORAZIL, Eduard a Jan HRSTKA. Strojírenské materiály a povrchové úpravy: určeno pro posl. fak. strojní. 1. vyd. Brno: VUT, 1985, 330 s.
- [8] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka : určeno [také] pro studenty středních průmyslových škol hutnických. 3., upr. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1977, 400 s.
- [9] HLUCHÝ, Miroslav, Rudolf PAŇÁK a Oldřich MODRÁČEK. Strojírenská technologie 1. 3. přeprac. vyd. Praha: Scientia, 2002, 173 s. ISBN 80-7183-265-0.
- [10] SVOBODA, Pavel. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 3. Brno: CERM, 2009, 223 s. ISBN 978-80-7204-636-2.
- [11] HRUBÝ, V., TULKA, J., KADLEC, J. *Povrchové technologie*. 1. vyd. Brno: Vojenská akademie, 1995, 120 s.
- [12] *Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT* [online]. 2014 [cit. 2015-18-4]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/fyzika_materialu/cviceni/10%20Difuze%20I.pdf

- [13] *Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT* [online]. 2014 [cit. 2015-18-4]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/04%20-%20Druhy%20a%20zpusoby%20TZ.ppt
- [14] Maciej Korecki. *Další vývojový krok nízkotlaké cementace - PreNitLPC®*. TechPark vydavatelstvo. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/dalsi-vyvojovy-krok-nizkotlake-cementace-prenitlpc.html>
- [15] Ing. Petra Salabová. TechPark vydavatelstvo. *Podtlaková cementace*. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32013/podtlakova-cementace.html>
- [16] Tos Varnsdorf. *Chemische und thermische Metallbearbeitung*. [online]. [cit. 2015-04-30]. Dostupné z: <http://www.tosvarnsdorf.cz/de/dienste/chemische-und-thermische-metallbearbeitung/>
- [17] KLIMČÁKOVÁ, K. *Výzkum a vývoj povrchových úprav ložiskových ocelí metodou iontové nitridace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.
- [18] Učíme v prostoru. *Tepelné zpracování kovů*. [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2888
- [19] *Úvod do difuze v kovech a slitinách*. [online]. [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: home.zcu.cz/~bebrl/Fmm/uvod_do_difuze_v_kovech_a_slit.doc