

Difúzní pochody v technologii výroby ozubených kol cementováním

Diplomová práce

Studijní program: N2301 – Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T048 – Strojírenská technologie a materiály
Autor práce: **Bc. Kateřina Vodičková**
Vedoucí práce: prof. Ing. Iva Nová, CSc.



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Kateřina Vodičková**
Osobní číslo: **S14000351**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Strojírenská technologie a materiály**
Název tématu: **Difúzní pochody v technologii výroby ozubených kol cementováním**
Zadávací katedra: **Katedra strojírenské technologie**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s problematikou difúzních pochodů v kovech. Současně se zaměřte na výpočty difúzních pochodů.
2. Prostudujte výrobu ozubených kol cementací.
3. Proveďte výpočty difúze uhlíku za různých podmínek při cementaci ozubených kol.
4. Na základě výroby a získaných ozubených kol proveďte metalografickou analýzu za účelem stanovení nadifundované vrstvy.
5. Zhodnoťte dosažené výsledky a formulujte dílčí závěry.

Rozsah grafických prací: **tabulky, grafy**
Rozsah pracovní zprávy: **cca 50 stran**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**
Seznam odborné literatury:

- [1] **PLUHAŘ, J., KORRITA, J.** *Strojírenské materiály. Druhé, přepracované vydání. Praha 1977.*
[2] **PTÁČEK, L. a kol.** *Nauka o materiálu I. Druhé, opravené a rozšířené vyd., Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002, 505 s., ISBN 80-7204-193-1.*
[3] **PTÁČEK, L. a kol.** *Nauka o materiálu II. Druhé, opravené a rozšířené vyd., Akademické nakladatelství CERM, Brno, 2002, 350 s., ISBN 80-7204-130-4.*
[4] **FIALA, J., MENTL, V., ŠUTTA, P.** *Struktura a vlastnosti materiálů. 1. vyd., ACADEMIA Praha, 2003, 561 s., ISBN 80-200-1223-0.*

Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Iva Nová, CSc.**
Katedra strojírenské technologie
Konzultant diplomové práce: **Ing. Jiří Machuta, Ph.D.**
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání diplomové práce: **1. listopadu 2016**
Termín odevzdání diplomové práce: **1. dubna 2018**

prof. Dr. Ing. Petr Loufěld
děkan



doc. Ing. Janemír Moeávec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 2. listopadu 2015

Prohlášení

Byla jsem seznámena s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědoma 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.

Diplomovou práci jsem vypracovala samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Současně čestně prohlašuji, že tištěná verze práce se shoduje s elektronickou verzí, vloženou do IS STAG.

Datum:

Podpis:

Difúzní pochody v technologii výroby ozubených kol cementováním.

Diffusion processes in the technology of cogwheels cementation.

ANOTACE

Diplomová práce shrnuje informace o difúzních pochodech a jejich výpočtech. Blíže se pak zabývá cementací a následných tepelným zpracováním ozubených kol, výpočtem a praktickým ověřením cementační vrstvy.

Klíčová slova: Difúze, cementace, chemicko-tepelné zpracování, cementační vrstva, mikrostruktura

ANNOTATION

The Diploma thesis summarizes information about diffusion processes in metals and their calculation. The Diploma thesis closer describes cementation and following thermal treatment of cogwheels, the calculation and practical check of cementation layer.

Keywords: Diffusion, cementation, chemical-thermal treatment, cementation layer, micro-structure.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěla poděkovat zejména vedoucí mé diplomové práce paní prof. Ing. Ivě Nové, CSc. za poskytnutí cenných rad, systematické vedení, čas a trpělivost.

Kolegům ze Škoda Auto a.s. děkuji za odbornou pomoc, informace, poskytnutí dílů a prostoru pro provedení experimentu.

Obsah

1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	10
2.1.1 Charakteristika difúze.....	10
2.1.2 Difúze v kovech.....	11
2.2 Chemicko-tepelné zpracování [1].....	18
2.2.1 Fyzikálně-chemické zákonitosti procesu chemicko-tepelného zpracování [13]	19
2.2.2 Faktory ovlivňující proces difúze [13].....	21
2.3 Cementace	21
2.3.1 Cementace v pevném prostředí	22
2.3.2 Cementace v plynném prostředí.....	23
2.3.3 Cementace v kapalném prostředí.....	24
2.3.4 Cementace ve vakuu	24
2.3.5 Cementace v plazmě	25
2.3.6 Tepelné zpracování po cementaci.....	26
3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST	29
3.1 Objekt experimentu.....	29
3.2 Popis experimentu	30
3.3 Teoretické výpočty difúze uhlíku při cementaci	32
3.4 Metalografická analýza	36
3.4.1 Postup přípravy vzorků pro metalografické pozorování	36
3.4.2 Optické měření cementační vrstvy	37
3.4.3 Určení cementační vrstvy na základě měření mikrotvrdomosti.....	41
3.4.4 Mikrostruktura cementovaných a tepelně zpracovaných vzorků	45
3.5 Vliv teploty na proces cementace.....	48
3.6 Shrnutí a diskuse výsledků	51
4. ZÁVĚR	54
Seznam použité literatury	56

Seznam použitých zkratk a symbolů

β	součinitel sdílení uhlíku	$[\text{m}\cdot\text{s}^{-1}]$
c_0	počáteční koncentraci prvku v materiálu	$[\%]$
c_1	koncentrace prvku v materiálu na styku s difúzní atmosférou	$[\%]$
$c_{(x)}$	koncentrace v místě x	$[\%]$
CHD	cementační vrstva	
D	difúzní koeficient	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
D_0	frekvenční faktor difúze	$[\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}]$
ΔH_D	aktivační energie difúze	$[\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}]$
$\text{erf}(z)$	chybová funkce	
HRC	zkouška tvrdost dle Rockwella	
HV	zkouška tvrdost dle Vickerse	
J	difúzní tok	$[\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}]$
Q	aktivační energie	$[\text{J}]$
R	plynová konstanta	$[\text{J}\cdot\text{kmol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}]$
T	absolutní teplota	$[\text{K}]$
t	čas probíhající difúze	$[\text{s}]$
x	místo sledované difúze	
z	argument chybové funkce	

1. ÚVOD

Difúze, respektive difúzní pochody jsou založeny na tendenci všech látek rozptylovat se z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace za účelem dosažení rovnoměrné koncentrace v daném objemu. Difúze může probíhat ve všech skupenstvích, v *kapalném*, *plynném* i v *pevném*, přičemž v pevném prostředí představuje difúze jediný způsob přenosu hmoty.

Difúze má důležitý význam v mnoha chemických, fyzikálních a biologických procesech. Ve strojírenské výrobě se často využívá difúze k tepelně povrchovým úpravám ocelových součástí (cementace, nitridace, karbonitridace, nitrocementace, atd.) za účelem zlepšení jejich mechanických vlastností, jako je tvrdost, pevnost, atd. V technické praxi se často používá cementace, jejímž účelem je zabezpečit u konstrukční součásti (např. ozubeného kola, hřídele) tvrdost, popř. pevnost povrchu, a současně zachovat houževnaté jádro. Houževnaté jádro zabezpečují oceli s nízkým obsahem uhlíku do cca 0,2 %. Ocel s obsahem 0,2 % C však po procesu kalení nezabezpečí vznik potřebného množství martenzitu. Teoretické množství uhlíku pro kalení oceli je 0,3 %. Příznivější je pro kalení ještě vyšší obsah uhlíku - cca 0,7 až 0,8 %. Proto je nutno povrch ocelové konstrukční součásti nasytit uhlíkem – cementovat.

Samotná cementace by však nepřinesla žádaný výsledek bez následného tepelného zpracování. Současné tepelné zpracování např. ozubených kol se provádí cementací ve vsázkových pecích, nebo ve vakuu, s následným martenzitickým kalením a nízkoteplotním popouštěním. Martenzitická struktura v povrchové vrstvě ozubeného kola zvyšuje tvrdost a odolnost povrchu proti otěru.

Tato diplomová práce se zabývá difúzními pochody v technologii výroby ozubených kol cementováním. V teoretické části této diplomové práce je popsána podstata difúze a potom blíže difúze v kovech. Následně je pozornost věnována přímo sycení ocelí uhlíkem, tedy cementaci, a následnému tepelnému zpracování. Součástí je třeba po samotném nasycení uhlíkem pro získání tvrdé povrchové vrstvy a houževnatého jádra zakalit a následně pro snížení vnitřních pnutí a snížení zbytkového austenitu nízkoteplotně popustit.

V rámci provedeného experimentu byla ozubená kola ze stejné tavby, tzn. se stejným chemickým složením a zpracováním, cementována na tři dané hloubky cementace. Následně byly provedeny výpočty sycení povrchu oceli uhlíkem za různých

časových podmínek. K demonstraci vlivu teploty na proces cementace byl na závěr diplomové práce proveden experiment, kdy byla snížena teplota cementace a zkoumány vlivy této změny na ostatní parametry procesu.

Vedle jednoznačných vstupních veličin je pro přesnější výpočet difúze třeba zohlednit i tzv. přestupový koeficient sdílení uhlíku β . Tento koeficient ovlivňuje tloušťku tepelné mezní vrstvy na rozhraní atmosféra-kov, vznikající v důsledku přenosu tepla, a definuje množství atomů uhlíku, které přijme povrch oceli z atmosféry, [13].

Cílem experimentální části je porovnání teoretických výpočtů se skutečností. Za účelem zjištění skutečné hloubky cementace byly z cementovaných ozubených kol vytvořeny metalografické vzorky a tyto podrobeny optickému měření cementační vrstvy na mikroskopu.

Dále byla za účelem určení cementační vrstvy měřena mikrotvrdość dle Vickerse. Tato metoda je definována v normě ČSN EN ISO 2639.

Proces cementace a následného tepelného zpracování ovlivňuje mikrostrukturu cementované oceli. Výsledná mikrostruktura byla zkoumána a nasnímána na mikroskopu.

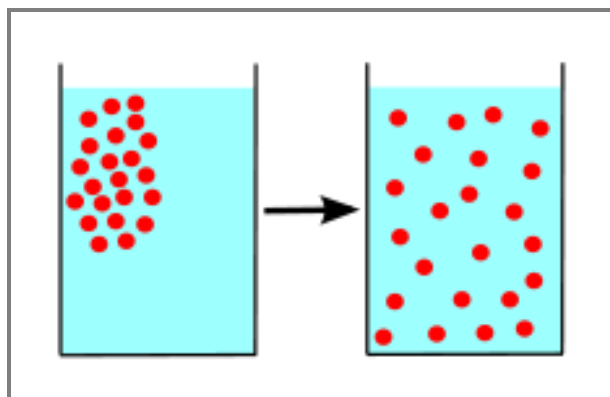
Diplomová práce vznikla na základě finanční podpory projektu studentské grantové soutěže SGS 21122 ze strany Technické univerzity v Liberci v rámci podpory specifického vysokoškolského výzkumu.

2. TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část diplomové práce je zaměřena na teoretické poznatky k problematice difúzních pochodů v kovech, jejich výpočtů a aplikaci při chemicko-tepelném zpracování kovů. Nejprve jsou představeny zákony popisující mechanismus difúze, tj. Arrheniova rovnice a první a druhý Fickův zákon. Dále je pozornost věnována cementaci a následnému tepelnému zpracování ocelí.

2.1.1 Charakteristika difúze

Difúze je samovolné pronikání molekul (atomů, iontů aj.) z oblasti vyšší koncentrace do oblasti nižší koncentrace vlivem tepelného pohybu částic (atomů, molekul, skupin molekul) a jejich srážek. Jedná se o přenos látky ve směru proti gradientu koncentrace s cílem dosáhnouti rovnoměrné koncentrace v daném objemu. V opačném případě se jedná o „obrácenou difúzi“. Podstatou difúze je tepelný pohyb částic, což poukazuje na silnou závislost difúze na teplotě, [4]. Na obr. 2-1 je naznačen obecný význam procesu difúze.



Obr. 2-1: Difúze částic z místa o vyšší koncentraci do místa s nižší koncentrací [9]

Difúze probíhá ve všech třech skupenstvích, nejrychleji v plynném a nejpomaleji v pevném. V případě řešení této diplomové práce se zaměříme na difúzi v pevném prostředí - na difúzi v kovech. Difúzí se uskutečňují všechny mezifázové procesy, například vznik roztoků, absorpce plynů atd., [4].

V metalurgii je difúze jedním z nejdůležitějších dějů při tuhnutí kovů a slitin a při jejich tepelném a tepelně chemickém zpracování. Rychlost difúze se řídí *Fickovými*

zákony, její mírou je *difúzní koeficient*. Z termodynamického hlediska je difúze typický nevratný proces spojený se vzrůstem entropie, [4].

Z technického hlediska spočívá význam difúze jak v prospěšných tak i v škodlivých změnách koncentrace a ve fázových či strukturních přeměnách. Přičemž tyto pochody mohou probíhat buď v povrchových vrstvách, nebo v celém objemu. Difúze může probíhat na povrchu, na hranici zrn, nebo v krystalické mřížce, [14].

2.1.2 Difúze v kovech

Mechanismus difúze v kovech spočívá ve vnikání atomů difundujícího prvku do porušené mřížky jiného kovu. Podle podmínek se atomy difundujícího kovu usazují do polohy mezi atomy krystalické mřížky (intersticiál), nebo do volného místa uzlového bodu (vakance). Vniknutí atomu jiného prvku do krystalické mřížky daného kovu závisí především na rozměrech jeho krystalické mřížky a rozměru atomu vnikajícího prvku. Příkladem je difúze uhlíku a dusíku do železa, resp. do oceli. Pro lepší představu jsou níže uvedeny velikosti atomů uhlíku a železa [4]:

- Poloměr atomu uhlíku: $0,77 \cdot 10^{-10}$ [m]
- Poloměr atomu železa: $1,28 \cdot 10^{-10}$ [m]

Difúze v ocelích také probíhá např. u perlitické a bainitické přeměny. U martenzitické přeměny se neuplatňuje, [14].

Pro řešení difúze v kovech je důležitá Arrheniova rovnice, která popisuje rychlost difúze - souvislost rychlosti pohybu atomů s aktivační energií. S rostoucí aktivační energií klesá rychlost difúzního děje. Rostoucí teplota zvyšuje pohyblivost atomů – zvyšuje difúzi, [4].

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_D}{RT}}, \quad (2.1)$$

kde značí:

D - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

D_0 - frekvenční faktor difúze [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

ΔH_D - aktivační energii difúze [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],

R - plynovou konstantu $8\,314$ [$\text{J} \cdot \text{kmol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$],

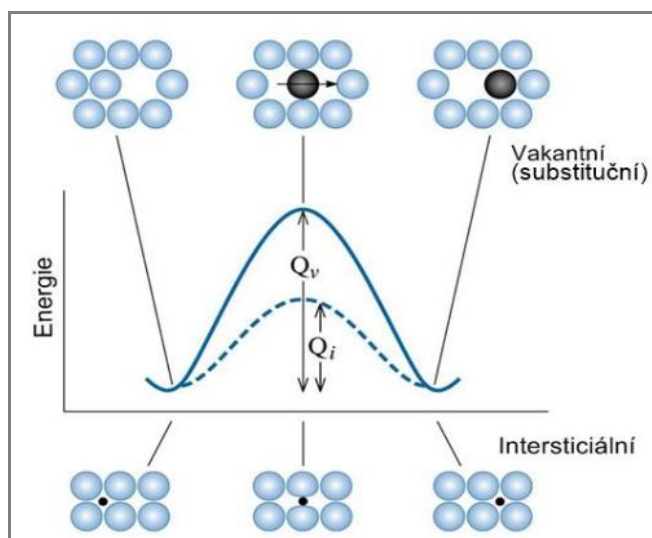
T - absolutní teplotu procesu difúze [K].

V tabulce 2-1 jsou uvedeny hodnoty difúzního koeficientu různých prvků v železe.

Tab. 2-1: Hodnoty difúzního koeficientu pro prvky v železe [4]

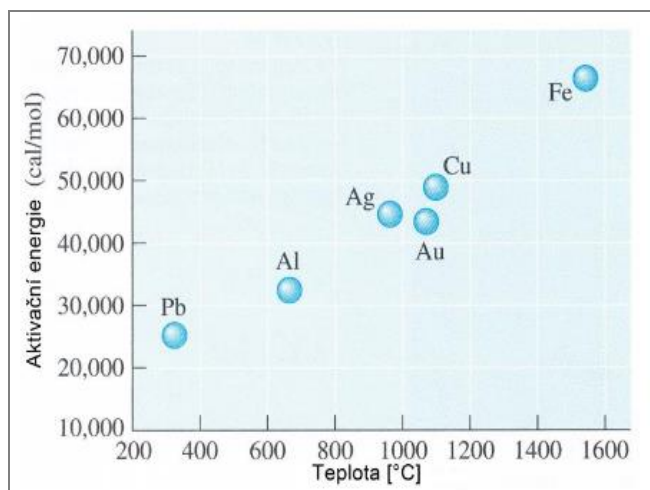
Difundující prvek	Difúzní prostředí	D_0 [$\text{m}^2 \text{s}^{-1}$]	ΔH_d [kJ mol^{-1}]	Rozmezí teplot	
				T [K]	t [$^{\circ}\text{C}$]
H	Fe α	$2,0 \cdot 10^{-7}$	12,1	293-1173	20-900
H	Fe γ	$6,7 \cdot 10^{-7}$	45,1	623-1323	350-1050
C	Fe α	$2,0 \cdot 10^{-6}$	84,1	293-1123	20-850
C	Fe γ	$4,0 \cdot 10^{-5}$	140,0	773-1373	500-1100
Mn	Fe α	$7,6 \cdot 10^{-5}$	225,0	1063-1173	790-900
Mn	Fe γ	$1,8 \cdot 10^{-5}$	264,0	1173-1573	900-1300
Fe	Fe α	$2,0 \cdot 10^{-4}$	241,0	673-1473	400-1200
Fe	Fe γ	$5,0 \cdot 10^{-5}$	284,0	773-1373	500-1100

Pro pohyb částice při difúzi (např. atomu uhlíku při cementaci kovů) je důležitá aktivační energie (Q). Při pohybu atomu do intersticiální polohy v krystalické mřížce je třeba méně aktivační energie (Q_i) než při pohybu do místa vakance (Q_v), jak je schematicky naznačeno na obr. 2-2.



Obr. 2-2: Závislost aktivační energie na mechanismu difúze [9]

Velikost aktivační energie je dále závislá na uspořádání krystalové mřížky. V případě těsného uspořádání krystalové mřížky je třeba více energie než u méně těsného uspořádání. Vliv má také vazba mezi atomy. Čím je pevnější, tím vyšší aktivační energie je k difúzi potřeba. Na obr. 2-3 je znázorněna závislost aktivační energie samodifúze na teplotě tání daných kovů, [9].



Obr. 2-3 Souvislost aktivační energie samodifúze a teploty tání [9]

Proces a rychlost difúze lze popsat dvěma Fickovými zákony, které jsou mimo podmínek difúze závislé na difúzním koeficientu.

I. Fickův zákon popisuje difúzi při ustálených podmínkách, tzn., že se koncentrační gradient $\partial c/\partial x$ v čase nemění. Difundující částice se pohybují ve směru klesající koncentrace. I. Fickův zákon stanovuje difúzní tok J dané látky. Difúzní tok J je dán počtem atomů, které projdou jednotkovou plochou kolmou ke směru difúze za jednotku času a je přímo úměrný difúznímu koeficientu D , [6].

$$J = -D \cdot \frac{\partial c(x)}{\partial x}, \quad (2.2)$$

kde značí:

J - difúzní tok [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$],

D - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

$c(x)$ - koncentraci difundujícího prvku v místě x ,

x - místo sledované difúze,

$\frac{\partial c(x)}{\partial x}$ - gradient koncentrace látky v místě x [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-4}$].

Difúzní koeficient udává počet molů dané složky, který projde jednotkovou plochou za jednotku času při jednotkovém spádu koncentrace složky. Symbol parciální derivace naznačuje, že koncentrace je proměnná nejen v prostoru, ale i v čase, [6].

Pro popis difúze v reálných podmínkách při zpracování kovů a jejich slitin je důležitý II. Fickův zákon, který řeší difúzi při nestacionárních podmínkách. Rychlost

změny koncentrace v daném místě, způsobená difúzí, je úměrná změně gradientu koncentrace v tomto místě. Pro výpočet difúze byla použita rovnice (2.3):

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} \quad (2.3)$$

kde značí:

c - koncentraci difundujícího prvku v určitém místě materiálu,

x - souřadnice probíhající difúze,

D - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

t - čas probíhající difúze [s].

Pro řešení rovnice (2.3) je možné pro případ prostředí sytící atmosféra - kov, resp. pro polonekonečné prostředí ($0 < x < \infty$) psát rovnici (2.4), která zahrnuje Gaussův integrál chyby. Musí ale platit **následující podmínky**:

- **počáteční podmínka před difúzí:** při $t = 0$ je počáteční koncentrace c_0 v každém místě $x > 0$,
- **okrajová podmínka:** na rovinném rozhraní v místě $x = 0$ se udržuje stálá koncentrace c_1 po celou dobu $t > 0$.

$$\frac{c_{(x,t)} - c_0}{c_1 - c_0} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{x}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] \quad (2.4)$$

kde značí:

$c_{(x,t)}$ - koncentraci prvku (např. uhlíku) v určitém místě x materiálu,

c_0 - počáteční koncentraci prvku v materiálu,

c_1 - koncentraci difundujícího prvku na styku sytící atmosféra-kov,

x - místo sledované koncentrace difundujícího prvku,

D - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

t - čas difúze [s].

Z důvodu, že při přenosu tepla vzniká na rozhraní prostředí atmosféra-kov tepelná mezní vrstva, je nutno pro přesnější výpočet difúze uvažovat tzv. přestupový koeficient sdílení uhlíku β . Tento koeficient definuje tok atomů uhlíku z atmosféry k povrchu oceli

a zahrnuje přenos uhlíku přes vrstvu plynu v blízkosti povrchu oceli a kinetiku povrchových reakcí, [13]. Hodnotu x pro rovnici (2.4), lze vypočítat ze vztahu (2.5):

$$x = h + \frac{D}{\beta} \quad (2.5)$$

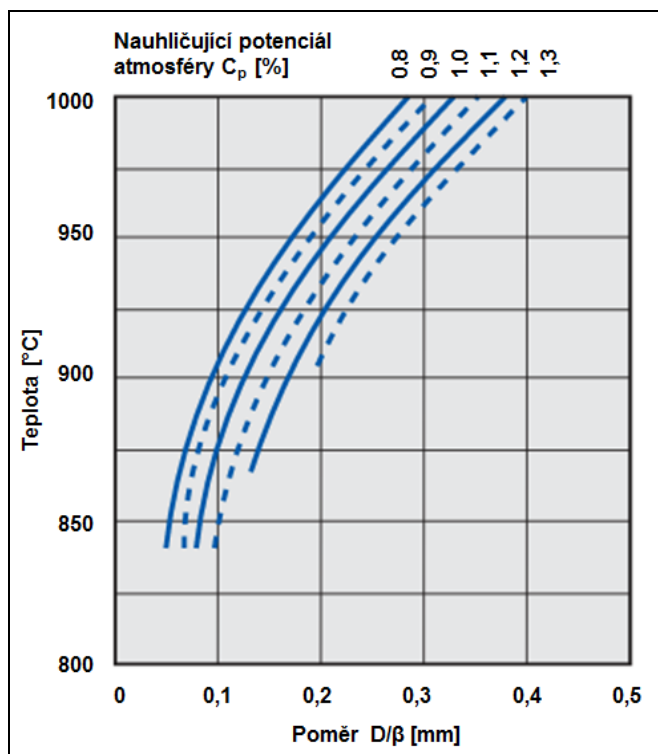
kde značí:

x - místo sledované koncentrace difundujícího prvku,

D - difúzní koeficient [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$],

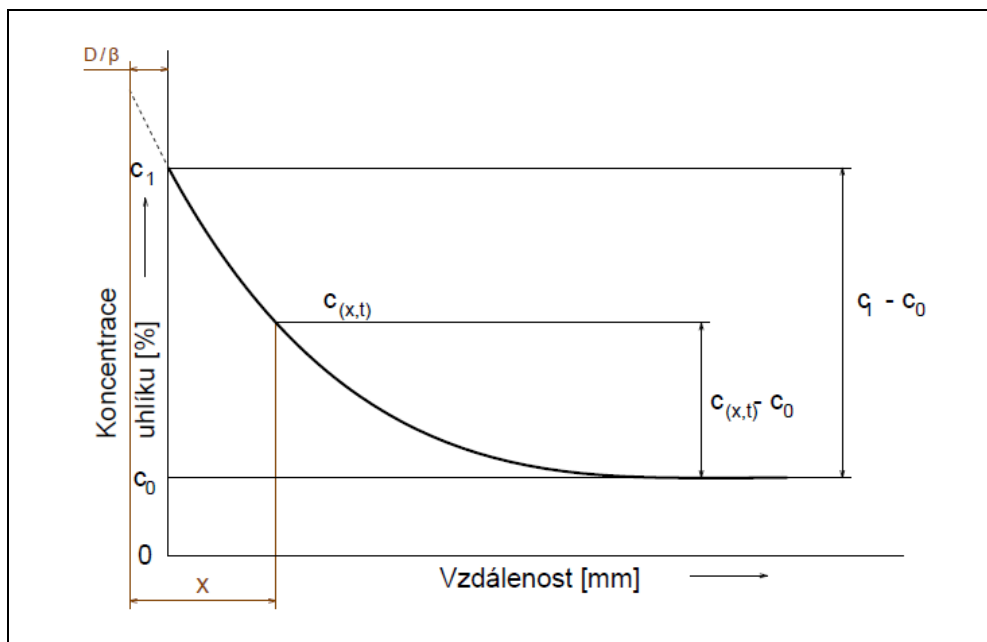
β - součinitel sdílení uhlíku [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$].

Poměr D/β určuje tloušťku tepelné mezní vrstvy na rozhraní atmosféry a nauhličovaného povrchu a tím i množství atomů uhlíku, které přijme povrch oceli, viz rovnici (2.5) a obr. 2-4. Protože se budeme v experimentální části této diplomové práce zabývat cementací v plynu, určíme koeficient sdílení uhlíku β z obr. 2-3. Při znalosti cementační teploty a nauhličujícího potenciálu nasycující atmosféry lze na základě dané křivky vyčíst poměr D/β . Z tohoto poměru určíme po výpočtu difúzního koeficientu D koeficient sdílení uhlíku β .



Obr. 2-3: Hodnoty D/β pro cementaci v plynu [19]

Na obr. 2-4 jsou znázorněny křivky koncentrace difundujícího prvku v závislosti na vzdálenosti od povrchu.

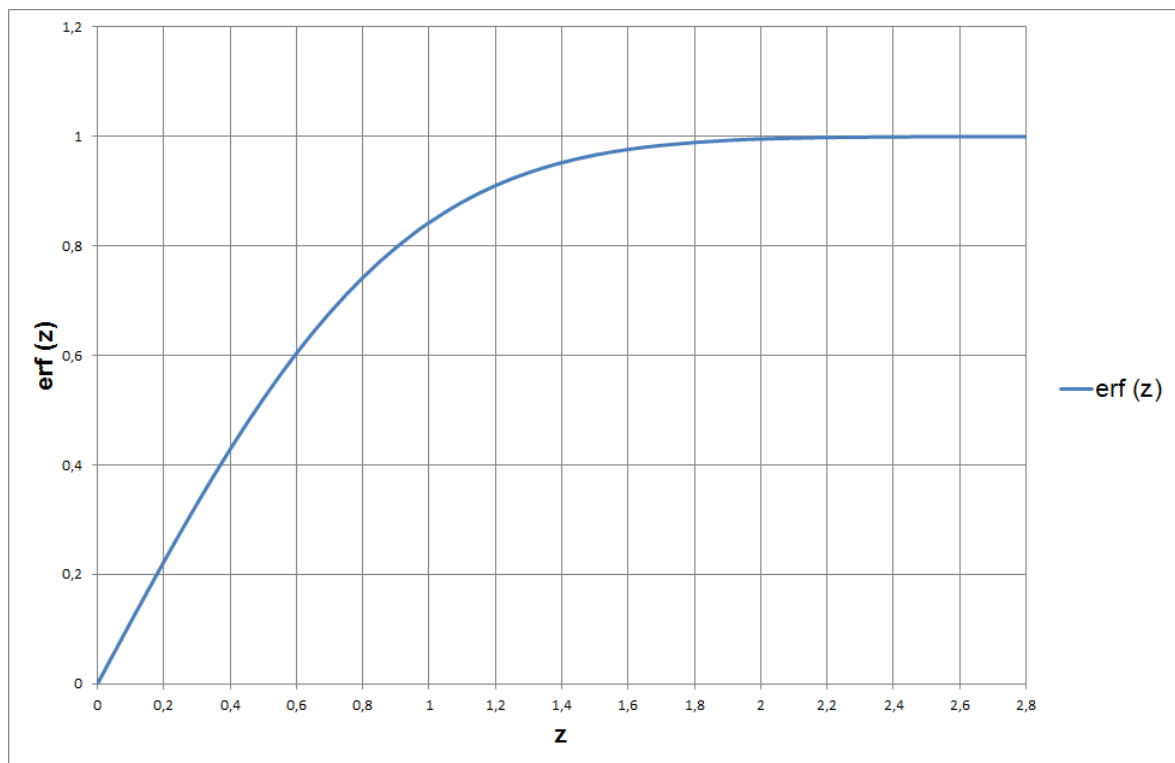


Obr. 2-4: Závislost koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu

V rovnici (2.4) je zohledněna tzv. chybová funkce neboli Gaussův integrál chyb. Na následující stránce jsou v tabulce 2-2 uvedeny hodnoty argumentu z a k tomu dané hodnoty funkce $\text{erf}(z)$. V grafu 2-1 je znázorněna křivka Gaussova integrálu chyb.

Tab. 2-2: Hodnoty chybové funkce $\text{erf}(z)$

z	erf(z)	z	erf(z)	z	erf(z)
0	0	0,55	0,5633	1,3	0,9340
0,025	0,0282	0,6	0,6039	1,4	0,9523
0,05	0,0564	0,65	0,6420	1,5	0,9661
0,1	0,1125	0,7	0,6778	1,6	0,9763
0,15	0,1680	0,75	0,7112	1,7	0,9838
0,2	0,2227	0,8	0,7421	1,8	0,9891
0,25	0,2763	0,85	0,7707	1,9	0,9928
0,3	0,3286	0,9	0,7969	2	0,9953
0,35	0,3794	0,95	0,8209	2,2	0,9981
0,4	0,4284	1	0,8427	2,4	0,9993
0,45	0,4755	1,1	0,8802	2,6	0,9998
0,5	0,5205	1,2	0,9103	2,8	0,9999

Graf 2-1: Chybová funkce $\text{erf}(z)$

2.2 Chemicko-tepelné zpracování

V praxi je z technických důvodů často požadován tvrdý povrch daného materiálu či dílu a současně houževnaté jádro. Tyto vlastnosti lze dosáhnout povrchovým kalením nebo pochody, které jsou souhrnně označovány jako chemicko-tepelné zpracování. Cílem chemicko-tepelného zpracování je:

- dosažení rozdílných mechanických, nebo chemických vlastností povrchu a jádra součásti,
- zvýšení tvrdosti a odolnosti proti opotřebení, únavě a korozi,
- zachování houževnatého jádra, [1].

Při pochodech chemicko-tepelného zpracování probíhá difúzní sycení povrchu oceli kovem nebo nekovem za zvýšené teploty. Přitom se mění chemické složení a tím i vlastnosti syceného povrchu. Pod povrchovou vrstvou zůstává chemické složení základního materiálu nezměněno. Na obr. 2-5 jsou uvedeny druhy sycení povrchu kovy a nekovy, [1].



Obr. 2-5: Typy sycení povrchu dle sytícího prvku [1]

Nejčastějším chemicko-tepelným zpracováním je cementování a nitridování, nebo jejich kombinace. U některých druhů sycení je třeba materiál následně tepelně zpracovat, [8].

2.2.1 Fyzikálně-chemické zákonitosti procesu chemicko-tepelného zpracování [13]

Při chemicko-tepelném zpracování je za chemického působení za zvýšené teploty dosaženo změny chemického složení povrchové vrstvy kovů a slitin. Prvky, jejichž atomy difundují do upravované struktury povrchu kovů, nebo slitin musí v materiálu tvořit:

- a) intersticiálně tuhé roztoky (C, N, B, H),
- b) substituční tuhé roztoky (Cr, Al, Si a jiné),
- c) případně chemické sloučeniny.

Rozkladem molekul chemických sloučenin na nasycovaném povrchu vznikají aktivní atomy difundujícího prvku. Aktivní atomy, které pronikly do povrchu a zůstaly v něm absorbované, se přemísťují z povrchu dovnitř do difúzní vrstvy v souladu s difúzními zákony.

Difúzní vrstva se odlišuje svým chemickým složením od jádra. Může být tvořena základním kovem a difundujícím prvkem, tuhým roztokem, chemickou sloučeninou, nebo kombinací tuhého roztoku a chemické sloučeniny.

Procesy chemicko-tepelného zpracování se uskutečňují současným průběhem čtyř základních dílčích procesů:

- a) adsorpce – vázání molekul chemických sloučenin nasycovaným povrchem,
- b) disociace – rozklad chemických sloučenin a uvolnění aktivních atomů,
- c) absorpce – pohlcení aktivních atomů absorpčním povrchem,
- d) difúze – přemísťování absorbovaných atomů směrem od povrchu do difúzní vrstvy.

Tyto procesy probíhají současně a úzce spolu souvisí. Poměr rychlostí procesů má velká vliv na výsledné vlastnosti a rychlost tvorby difúzní vrstvy.

Adsorpce: V případě adsorpce jsou molekuly chemických sloučenin vázány nasycovaným povrchem. Jedná se o slabou interakci mezi molekulami chemických sloučenin a povrchem základního materiálu. Adsorpce neprobíhá na celém povrchu, ale jen v aktivních místech, v tzv. multiplétách, které mají vhodnou krystalografickou stavbu pro adsorpci. Počet aktivních míst se odvíjí od toho, jak moc je povrch znečištěn a zoxidován. Při silném znečištění počet aktivních míst klesá a může dojít k zpomalení růstu difúzní vrstvy. Případně dochází k lokální různorodosti hrubosti, struktury a složení vrstvy. Počet aktivních míst lze zvýšit vhodnou mechanickou, chemickou, nebo fyzikální

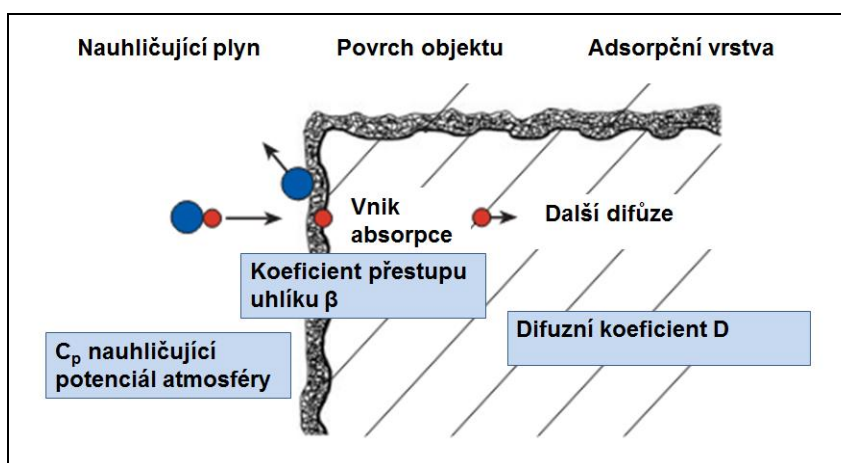
úpravou povrchu. Díly určené pro chemicko-tepelné zpracování, např. ozubená kola, je třeba po třískovém obrábění důkladně odmastit.

Disociace: Při disociaci dochází k rozkladu molekul nasycujících sloučenin a vznikají volné aktivní atomy nasycujícího prvku. Přitom směřují chemické reakce k rovnovážnému stavu. 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 rychleji. Přibližováním se k rovnovážnému stavu rychlost reakce klesá.

Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost chemické reakce je adsorbovatelnost produktů termické disociace, např. vodíku, povrchem. Pokud je jejich adsorbovatelnost povrchem vyšší, obsazují aktivní místa a zabraňují tak přístupu molekulám, které jsou schopny uvolňovat atomy potřebné pro nasycení. Pro zvýšení rychlosti disociace je nutné tyto silně adsorbovatelné produkty rozkladu z povrchu odstranit, např. ultrazvukem, nebo snížit jejich parciální tlaky použitím směsných atmosfér.

Absorpce: Pouze malá část atomů vzniklých disociací molekul je absorbována (pohlčena) povrchem základního materiálu. Rychlost růstu difúzní vrstvy souvisí s koncentrací nasycujícího prvku. Pro dosažení co nejvyšší aktivity nasycujícího prvku je v praxi snaha zajistit co nejvyšší koncentraci molekul chemických sloučenin uvolňujících aktivní atomy. Závislost počtu absorbovaných atomů na čase chemicko-tepelného zpracování vykazuje parabolický průběh.

Difúze: Absorbované atomy se pohybují základním materiálem na základě difúzních zákonů ve směru koncentračního spádu. Difúze je podrobněji popsána v kapitole 2.1.1.



Obr. 2-6: Model pochodů při cementaci v plynu

2.2.2 Faktory ovlivňující proces difúze [13]

Následující faktory ovlivňují difúzní koeficient D a tím rychlost difúze:

- přísadové prvky,
- typ a deformace krystalové mřížky,
- vzájemná chemická afinita difundujících prvků,
- změna velikosti zrn kovu,
- změna rozpustnosti difundujícího prvku.

Přísadové prvky mohou mít kladný, či záporný vliv na hodnotu difúzního koeficientu. Karbidotvorné prvky s vyšší afinitou k uhlíku, jako např. Fe, zvyšují aktivační energii difúze Q a snižují tím jeho rychlost difúze v austenitu.

Nekarbidotvorné prvky naopak aktivační energii difúze uhlíku snižují a zvyšují tak jeho difúzní rychlost. Kyslík sice zpomaluje rychlost difúze uhlíku, ale urychluje difúzi dusíku v železe. Dusík urychluje difúzi uhlíku v austenitu.

Deformace krystalové mřížky snižuje aktivační energii difúze a zvyšuje tak difúzní koeficient D . Difúzní koeficient daného prvku v kubické prostorově centrované α mřížce je v porovnání s těsněji uspořádanou kubickou plošně centrovanou γ -mřížkou vyšší.

Difúze atomů na volném povrchu probíhá rychleji než po hranicích krystalových zrn. Nejnižší intenzita difúze je obvykle v objemu zrna. Rozdíly souvisí s mřížkovými poruchami a množstvím vakantních míst na volném povrchu a na hranicích zrn.

V případě, že adsorpce uhlovodíků a jejich tepelná disociace na nauhličovaném povrchu probíhá rychleji než absorpce atomů uhlíku povrchem, vytváří se na povrchu materiálu souvislá vrstvička sazí, která povrch izoluje a brzdí rychlost růstu difúzní vrstvy.

2.3 Cementace

Jak bylo již řečeno, patří cementace k nejpoužívanějšímu typu chemicko-tepelného zpracování. Při tomto procesu se sytí povrch uhlíkem do hloubky setiny milimetru až několik milimetrů při teplotě vyšší než A_{c3} . Hloubka cementované vrstvy je nejčastěji stanovována jako tloušťka, v níž je tvrdost nad 52 HRC, nebo obsah uhlíku nad 0,4 %. Obvyklá tvrdost cementované vrstvy se pohybuje mezi 58 až 62 HRC. Dobu cementace je třeba přesně určit v závislosti na teplotě cementace, požadované hloubce cementační vrstvy a typu oceli, [2].

Pro cementování se používají oceli s obsahem uhlíku do maximální koncentrace 0,25 hm. % C. Cementací se obsah uhlíku zvýší pouze v tenké povrchové vrstvě a to optimálně do eutektoidní koncentrace cca 0,8 hm. % C, případně jen mírně nad eutektoidní koncentraci. Nauhličující prostředí obsahuje vysoký obsah CO a nízký obsah CO₂, [13].

Teplota nauhličování leží v oblasti austenitu, nejčastěji v rozmezí 900 až 930 °C. Při vyšších teplotách dochází k hrubnutí zrna. Běžné oceli mají hranici hrubnutí zrna při teplotě 950 °C. Rozpustnost uhlíku v austenitu je až 2,11 hm. % C, [13].

Nevýhodou cementování je poměrně dlouhé trvání procesu a nevhodnost této metody pro tvarově složité součástky, protože hrozí jejich popraskání. Cementování může probíhat v plynném, kapalném, nebo pevném prostředí. Další možností je cementování ve vakuu a v plazmě, [13].

Po ukončení cementace se daná součást zakalí, aby bylo dosaženo vysoké tvrdosti povrchové vrstvy při současném zachování houževnatého jádra, a následně popustí při teplotách 150 až 200 °C, [8]. Tvrdá povrchová vrstva má martenzitickou strukturu. Martenzit vytváří v povrchové vrstvě tlakové napětí, čímž se dosáhne vysoké odolnosti proti porušení materiálu únavou, [13].

Na obr. 2-7 jsou zobrazeny způsoby cementace dle nasycujícího prostředí a tyto jsou následně blíže popsány.

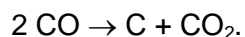
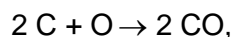
Sycení povrchu				
Pevné prostředí	Plynné prostředí	Kapalné prostředí	Vakuu	Plazma
Dřevěné uhlí, uhličitan barnatý	Směs uhlovodíků/ metan	Solné lázně: kyanidy	Metan/propan/ acetylen	Metan

Obr. 2-7: Druhy cementace dle použitého média

2.3.1 Cementace v pevném prostředí

Cementace v pevném prostředí se provádí ve směsi, jejímiž hlavními složkami jsou dřevěné uhlí, mletý koks a uhličitan barnatý BaCO₃.

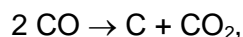




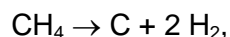
Dílce se vloží do uzavřené nádoby, kde se z prášku po zahřátí na cementační teplotu vytvoří CO, z něhož difunduje uhlík do povrchové vrstvy součásti. Výhodou této metody cementace je její jednoduchost. Pro své nevýhody, mezi které patří nemožnost kontroly chemického složení atmosféry, zdlouhavost, nerovnoměrnost hloubky nauhličení a koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě a nereprodukovatelnost, se tato metoda používá ojediněle v kusové výrobě, nebo v menších nástrojárnách. V sériové výrobě se nauhličování v pevném prostředí pro jmenované nevýhody nepoužívá, [8].

2.3.2 Cementace v plynném prostředí

Cementace v plynném prostředí je nejpoužívanější metodou cementace. Využívá se při ní reakcí, kdy se uvolňují atomy uhlíku. Tyto pak difundují do nauhličovaného materiálu. Lze využít reakce oxidu uhelnatého:



nebo rozpadu metanu



kde uhlík je rozpuštěný v austenitu. Vodík působí redukčně a chrání povrch součásti před oxidací, tj. před vznikem okují. Výhodou je čistý povrch součásti.

Dále se používá metanol, nebo endoatmosféra. Endoatmosféra se vyrábí v endotermických generátorech neúplným spalováním zemního plynu. Pro zvýšení uhlíkového potenciálu se do pece přidává určité množství zemního plynu, nebo propanu, [13].

V praxi se často využívá dvoustupňového procesu nasycování. V první, tzv. sytící fázi, se použije vysoký uhlíkový potenciál atmosféry, např. 1,1-1,2 hm. % C. V druhé fázi procesu, tzv. difúzní fázi, se nauhličující potenciál sníží na 0,8 hm. % C. Výsledkem dvoustupňového procesu je optimální obsah uhlíku ve vrstvě a zkrácení doby cementace až o 40 % oproti nauhličování při konstantním uhlíkovém potenciálu, [13].

Po určité době je v soustavě sytící atmosféry a syceného materiálu ustaven rovnovážný stav, který při konstantním tlaku závisí pouze na teplotě. V průmyslu se pro cementaci v plynném prostředí používají víceúčelové, nebo průběžné pece. Proces

cementace lze automatizovat a řídit. Tím je zajištěna reprodukovatelnost výsledků. Cementování v plynném prostředí je rychlejší než v sypké hmotě, [8].

2.3.3 Cementace v kapalném prostředí

V případě cementace v kapalném prostředí se využívalo kyanidových lázní. Ty byly ale kvůli jedovatosti zakázány. Proto byly vyvinuty cementační soli bez kyanidů, kde je zdrojem uhlíku Na_2CO_3 a SiC , [15].

2.3.4 Cementace ve vakuu

Cementace ve vakuu neboli nízkotlaká cementace se provádí ve vakuové peci za přítomnosti uhlovodíkových plynů. Přítom není přítomen kyslík v jakékoliv podobě, protože CO a H_2 reagují s tradičními materiály vakuových pecí – s grafitem a molybdenem, [13].

Při vakuové cementaci dochází k rovnoměrnému nasycení povrchové vrstvy uhlíkem. Výsledkem je velmi přesný a kvalitní povrch součástí. Další výhodou vakuové cementace je možnost kvalitně cementovat malé a zaslepené otvory. Díky malé spotřebě energie i uhlovodíků je metoda velmi ekologická. Nevýhodou vakuové cementace je sklon k tvorbě sazí. Aby se zabránilo vzniku sazí, je třeba snížit tlak, [2].

Pro cementaci ve vakuu se nejčastěji používá tlak v rozmezí 100 až 300 Pa, který umožňuje vysoký přísun uhlíku bez tvorby sazí v plynné fázi. Vakuová cementace se provádí při teplotách 830 až 980 °C, podle některých autorů až 1.040 °C, [13]. Zdrojem uhlíku jsou *plynné uhlovodíky*, nejčastěji *acetylen* (C_2H_2), *propan* (C_3H_8), *metan* (CH_4), *cyklohexan* (C_6H_{12}).

Výhodou cementace *ve vakuu* je přesnější kontrola nad procesem nauhličení v přesně říditelné tloušťce vrstvy. Dále ve vakuových pecích v podstatě nedochází k oxidaci. Časy potřebné k dosažení stejně tlusté nacementované vrstvy jsou kratší než při klasických způsobech cementace, [13].

Po vakuové cementaci následuje přímé kalení přetlakem plynu. Nejčastěji se používá dusík při přetlaku 1,5 MPa. Výhodou je odpadnutí nutnosti kalení v oleji a následné odmašťování. Tím se zkracuje délka procesu a snižují se náklady na zpracování, [13].

Vakuová cementace je vhodná pro díly vyžadující vysokou odolnost vůči opotřebení a dobrou únavovou životnost. Metoda nízkotlaké cementace se používá především při výrobě převodových kol a vstřikovačů naftových motorů. U těchto dílů je vyžadována homogenní cementová vrstva s minimálními rozměrovými odchylkami, [1].

Dále se používá pro:

- hřídele v automobilovém průmyslu,
- větrné turbíny a komponenty čerpadel,
- komponenty, kde je vyžadován dlouhodobý provoz při vysokém cyklickém zatížení.

2.3.5 Cementace v plazmě

Při cementaci plazmou se přímo do zařízení přivádí CH_4 . Plazma vzniká, když se mezi dvěma elektrodami (plášť pece má kladný pól a vsázka záporný pól) ve vakuu o tlaku 200 až 600 Pa vytvoří dostatečně vysoké jednosměrné napětí. Dochází ke štěpení molekul a k ionizaci atomů. Kladně nabité ionty jsou urychlovány směrem ke katodě a elektrony se pohybují k anodě. Plyn se stává vodivým. Na záporně nabitou vsázku dopadají ionty s vysokou kinetickou energií, která se mění na teplo a ohřívá vsázku. Zároveň dochází k odstranění pasivačních vrstev. Po cementaci v plazmě následuje difúzní žihání, [13].

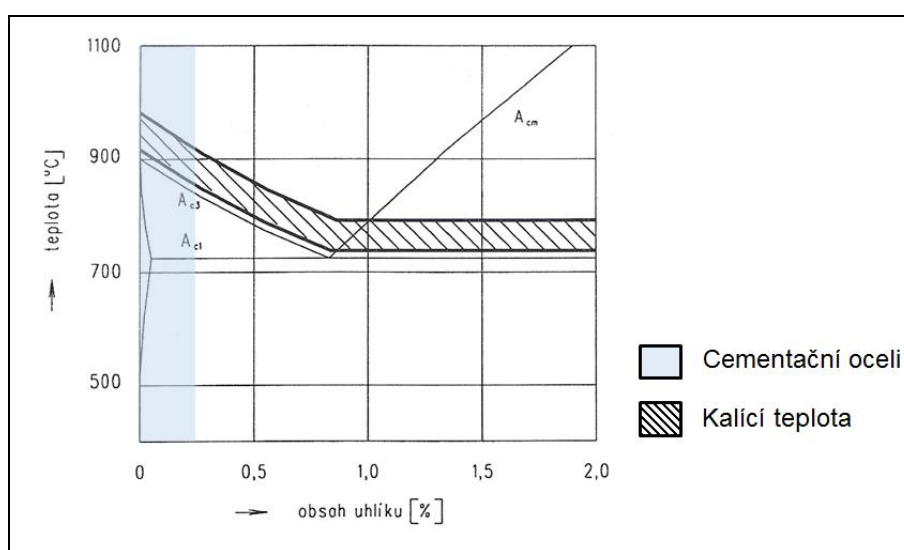
Cementace v plazmě je progresivní technologií skýtající následující výhody:

- kvalita zpracování,
- efektivnost využití nahličujícího plynu (až 55 %),
- krátký čas difúzního nasycování,
- čisté pracovní prostředí,
- jednoduchá regulace cementační hloubky změnou teploty, tlaku, času a hodnot výboje,
- ekologičnost,
- úspora energie.

2.3.6 Tepelné zpracování po cementaci

Aby bylo dosaženo tvrdé povrchové vrstvy a zachováno houževnaté jádro, musí být daná součást po cementaci zakalena. Ochlazujícím médiem je nejčastěji olej o teplotě 60 až 80 °C, [20]. U vakuové cementace se ke kalení používá přetlaku dusíku, viz kapitolu 2.3.4.

Na obr. 2-8 je znázorněna oblast cementačních ocelí. Jedná se o oceli s obsahem uhlíku do cca 0,25 %. Kalicí teploty se u těchto podeutektoidních ocelí pohybují v pásmu do zhruba 100 °C nad A_{c3} , u nadeutektoidních ocelí nad A_{c1} , [5].



Obr. 2-8: Kalicí teploty [5]

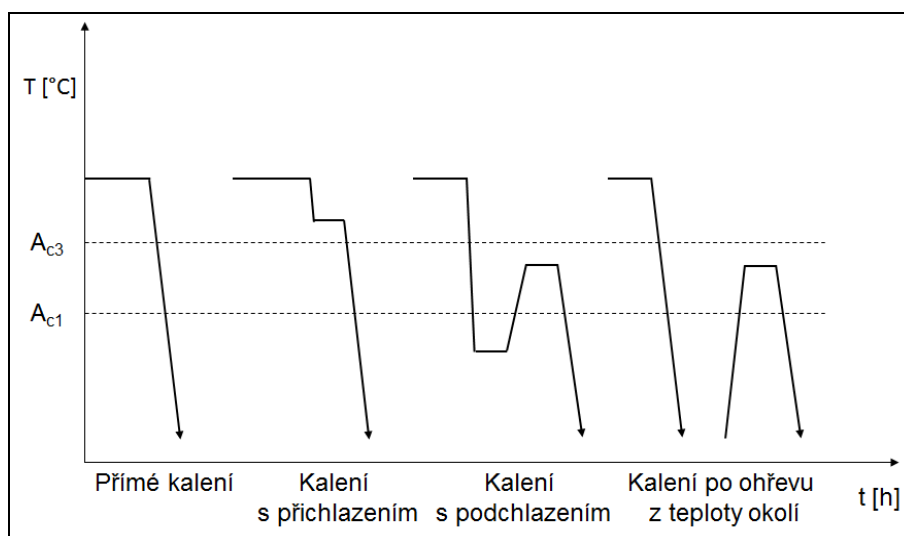
V praxi lze využít různé druhy kalení. Na obr. 2-9 jsou znázorněny základní druhy kalení a jejich teplotní průběhy.

U **přímého kalení** (též **křivka I** na obr. 2-10) je součást prudce ochlazena z cementační teploty, nejčastěji do vody. Přejít přes teploty martenzit start (M_s) a martenzit finiš (M_f) je velice rychlý. Výsledkem je křehká hrubozrnná martenzitická struktura s vysokým vnitřním pnutím. Proto se v praxi používá jen ojediněle. Takto zakalené součástky vykazují největší deformace a mají sklon k tvorbě trhlin. Lze je proto použít pouze pro podřadné účely. Výhodou je nízká cena, [5].

Při **kalení s přichlazením** se nechá součást vychladnout na teplotu nad A_{c3} a poté se prudce ochladí, [5]. V důsledku vysoké teploty a dlouhého času v procesu nauhličování zhrubne zrno. I výsledná martenzitická struktura je hrubozrnná, ale deformace součástky je menší, [13].

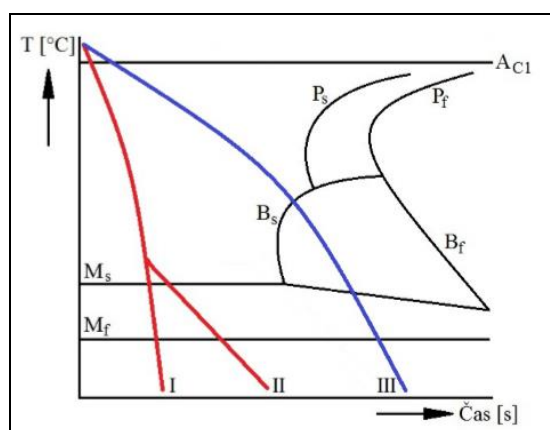
Z hlediska kvality je nejvýhodnější třetí způsob - **kalení s podchlazením**. Po nauhličení následuje ochlazení pod teplotu A_{c1} . Opětovným ohřevem nad teplotu A_{c1} dochází k překrytalizaci a ke zjemnění zrna. Po austenitizaci a rychlém ochlazení vzniká jemnozrnná martenzitická mikrostruktura povrchové vrstvy, [13].

Čtvrtý znázornění způsob - **kalení po ohřevu z okolní teploty** je ekonomicky nevýhodný, protože je třeba nechat součásti chladnout v ochranné atmosféře - nejčastěji v dusíku. Na vzduchu by došlo k nežádoucí oxidaci povrchu, [13].



Obr. 2-9: Druhy kalení po cementování [13]

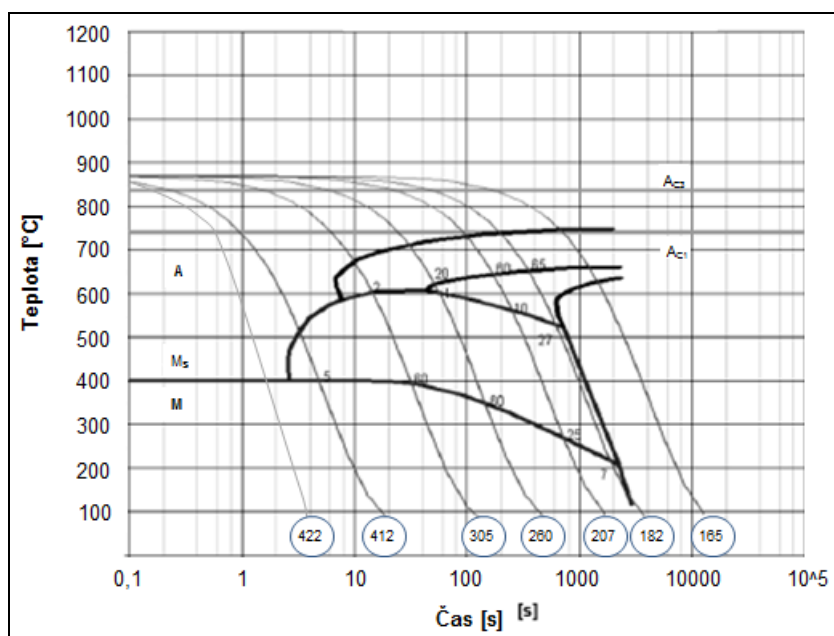
V praxi se častěji aplikuje kalení dle ARA diagramu. Na obr. 2-10 jsou v ARA diagramu naznačeny tři křivky průběhu chlazení, které jsou dále blíže popsány.



Obr. 2-10: Diagram ARA s vyznačením různých způsobů kalení [24]

Křivka I (červená křivka I) představuje již popsané nepřetržité (přímé) kalení. *Křivka II* znázorňuje přetržité (lomené) kalení. Postup při lomeném kalení je zpočátku stejný, jako u kalení přímého. Z kalící teploty se nejdříve prudce ochlazuje ve vodě, aby nedocházelo ke vzniku perlitu. Při dosažení teploty těsně nad M_s se kalená součást vyjme z vody a vloží se do kalícího prostředí s nižší rychlostí ochlazování, jako je například olej, viz červenou křivku II. Křivka III představuje nepřetržité bainitické kalení.

U oceli ČSN 14 220, ze které jsou vyrobena ozubená kola zkoumaná v experimentální části této diplomové práce, probíhá anizotermický rozpad austenitu podle obr. 2-11. Při rychlém ochlazení austenitu nadkritickou rychlostí pod teplotu M_s vzniká martenzit a zbytkový austenit. Zbytkový austenit vzniká tehdy, pokud teplota neklesne pod teplotu M_F a snižuje pevnost a tvrdost, [19].



Obr. 2-11: Diagram anizotermického rozpadu austenitu pro ocel ČSN 14 220 [21]

Kalením vzniklá martenzitická struktura vykazuje vysoké hodnoty strukturních a tepelných napětí. Pro jejich snížení musí bezprostředně po kalení následovat **nízkoteplotní popouštění** při teplotách 150 až 200 °C. Popouštění je provázeno mírným poklesem tvrdosti a zlepšením houževnatosti, [5, 13].

3. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

Předmětem praktické části této diplomové práce bude porovnání výpočtu hloubky cementační vrstvy ozubených kol s výsledky metalografické analýzy těchto ozubených kol. Za tímto účelem bude proveden experiment, blíže popsany v kapitole 3.2.

Nejpoužívanějším materiálem pro výrobu ozubených kol jsou oceli. Pro méně namáhaná kola se používají oceli třídy 11 a 12, přičemž se párují s pastorky z oceli třídy 12, nebo 13. Pro vyšší krouticí momenty se používají zušlechtěné oceli (12 600, 15 240) a oceli vhodné k cementování a zušlechtování, např. 12 060, 14 220, 15 241, [16].

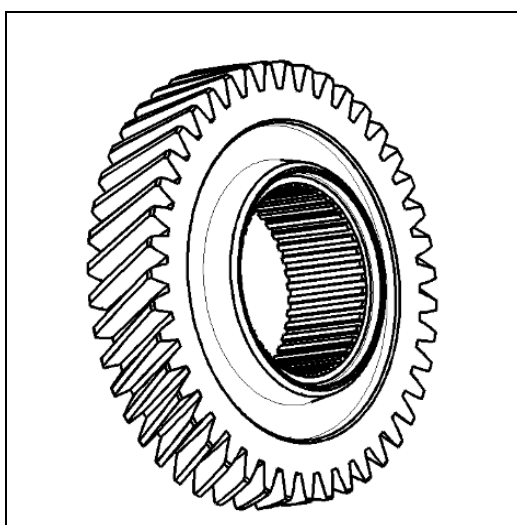
Cementace se provádí u velmi namáhaných ozubených kol. Nauhličením je dosaženo tvrdosti povrchové vrstvy 60 až 62 HRC. Od velikosti modulu se odvíjí doporučená tloušťka cementační vrstvy dle následujících vztahů, přičemž maximální tloušťka cementační vrstvy jsou 2 mm, [16]:

$$\delta = (0,2 \div 0,25) m, \text{ pro } m \leq 4 \text{ mm},$$

$$\delta = 0,5\sqrt{m}, \text{ pro } m > 4 \text{ mm}.$$

3.1 Objekt experimentu

Předmětem experimentu je hnací kolo 3. rychlosti, vyrobené z oceli ČSN 14 220. Na obr. 3-1 je vyobrazeno dané kolo ve 3D.



Obr. 3-1: Ozubené kolo 3. rychlosti

U oceli ČSN 14 220 se jedná o ocel patřící do skupiny ušlechtilých ocelí. Tato ocel je vhodná pro výrobu pohonných agregátů, hřídelí a ozubených kol.

Tři hnací kola 3. rychlosti z téže tavby byla před chemicko-tepelným zpracováním podrobena spektrální analýze za účelem zjištění chemického složení materiálu a metalografické analýze ke zjištění mikrostruktury. V tabulce 3-1 jsou uvedeny naměřené a normou předepsané hodnoty jednotlivých prvků. Obsah prvků leží v předepsaném obsahovém rozmezí.

Mikrostruktura byla posuzována dle normy ČSN 42 0003 a vykazuje lamelární perlit a ferit. Dále byla dle normy ČSN 42 0469 hodnocena řádkovitost. Po analýze nevykazuje materiál žádnou výraznou řádkovitost, [17].

Tab. 3-1: Chemické složení oceli ČSN 14 220

Naměřené hodnoty [%]		Předepsané hodnoty norma/materiálový list [%]	
Prvek	Hodnota	Min.	Max.
Uhlík	0,190	0,14	0,22
Křemík	0,110		0,12
Mangan	1,340	1,00	1,50
Fosfor	0,010		0,035
Síra	0,020	0,020	0,035
Chrom	1,180	0,80	1,30
Hliník	0,030	0,015	0,040
Dusík	0,011		0,015

3.2 Popis experimentu

V rámci experimentu byla ozubená kola 3. rychlosti cementována na tři různé tloušťky cementační vrstvy. Cementace probíhala v peci Monocarb R.SH.Z.M 7.16/10-C od firmy ZEZ Praha z roku 1978. Pec byla v roce 2012 rekonstruována a doplněna o automatické řízení. Sytící atmosférou je metanol a propan, který reguluje společně se vzduchem sytící potenciál nad 0,8 % C.

Sycení uhlíkem probíhá ve dvou fázích v časovém poměru cca 2:1. První, tzv. sytící fáze trvá cca 2/3 z celkového času cementace a uhlíkový potenciál má hodnotu

$c_{p1} = 1,2 \% C$. V druhé, tzv. difúzní fázi, je uhlíkový potenciál snížen na $c_{p2} = 0,8 \% C$. Tato fáze trvá cca 1/3 z celkové doby cementace. Dvoustupňovým procesem nasycování je v praxi dosaženo optimálního obsahu uhlíku v nauhličené vrstvě a zkrácení doby cementace v porovnání s nasycováním při konstantním uhlíkovém potenciálu, [13].

Proměnnou veličinou experimentu je čas cementace. Ostatní parametry zůstávají konstantní. Tlak v peci je víceméně atmosférický. Vznikající přebytek plynu se vyvádí z pece ven a je spalován.

Po cementaci se cementované díly nechají vychladnout na teplotu 720 °C. Poté jsou ohřáty na kalící teplotu 830 °C a následovně zakaleny v oleji o teplotě 80 °C. Po zakalení v oleji je nutné díly očistit v pračce. Po vyprání následuje proces nízkoteplotního popouštění. Díly se popouští dvě hodiny při teplotě 170 °C. Kalení a popouštění probíhá rovněž v uvedeném šachtovém souboru.

Cílem experimentu bylo cementovat ozubená kola do tří hloubek: 0,6 mm, 0,8 mm a 1,0 mm. Při cementaci byly uplatněny tyto podmínky experimentu:

Teplota cementace	$T = 920 \text{ °C} = 1.193 \text{ K}$
Uhlíkový potenciál nasycující atmosféry	$c_p = 1,2 \% C$
Počáteční koncentrace uhlíku v materiálu	$c_0 = 0,19 \% C$
Čas cementace dle hloubky cementace	$t_1 = 135 \text{ min}$ $t_2 = 210 \text{ min}$ $t_3 = 300 \text{ min}$

V tabulce 3-2 jsou uvedeny hodnoty sytícího potenciálu c_{p1} , c_{p2} a příslušné časy.

Tab. 3-2: Hodnoty sytícího potenciálu a času

HLOUBKA VRSTVY	SYTÍCÍ POTENCIÁL ATMOSFÉRY A ČAS	
	$c_{p1} = 1,2 [\% C]$	$c_{p2} = 0,8 [\% C]$
	t [min]	t [min]
0,6 mm	90	45
0,8 mm	140	70
1,0 mm	210	90

Na obr. 3-2 jsou snímky v rámci experimentu cementovaných a tepelně zpracovaných ozubených kol.



Obr. 3-2: Chemicko-tepelně zpracovaná hnací kola 3. rychlosti

3.3 Teoretické výpočty difúze uhlíku při cementaci

Výpočet difúze uhlíku byl proveden na základě zákonitostí uvedených v kapitole 2.2, dále s použitím vztahů (2.3), (2.4), (2.5) a (3.2). Nejprve byla vypočítána hodnota *difúzního koeficientu* D podle vztahu (3.2). Potřebné vstupní hodnoty D_0 a ΔH_D jsou uvedeny v tabulce 2-1, pro uhlík i pro železo γ . Po dosazení hodnot do vztahu (3.2) je hodnota difúzního koeficientu $D_{920} = 2,97 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$.

$$D = D_0 \cdot e^{-\frac{\Delta H_D}{RT}} \quad (3.2)$$

$$D_{920} = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-\frac{140000}{8,314(920+273)}}$$

$$D_{920} = 2,97 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

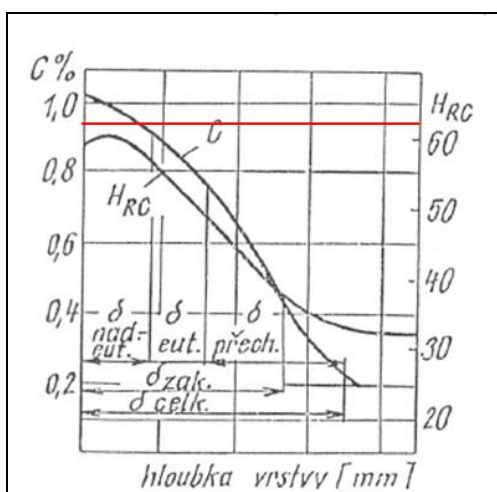
Pro další výpočty bylo třeba určit *koeficient přestupu uhlíku* β z obr. 2-3. Při cementační teplotě 920 °C a nauhličujícím potenciálu atmosféry c_p 1,2 % má být poměr $D/\beta = 0,2 \text{ [mm]}$, tzn. $2 \cdot 10^{-4} \text{ [m]}$. K hodnotě β dojdeme následujícím výpočtem:

$$\frac{D_{920}}{\beta} = 2 \cdot 10^{-4}$$

$$\beta = \frac{2,97 \cdot 10^{-11}}{2 \cdot 10^{-4}} = 1,49 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Pro dosažení do upravené Arrheniovy rovnice (3.2) je nutno znát ještě koncentraci $c_{(x,t)}$ v určité vzdálenosti od povrchu a koncentraci uhlíku c_1 na styku atmosféra-cementovaný předmět.

Koncentraci $c_{(x,t)}$ lze kromě výpočtu určit také dle výsledků měření tvrdosti. Naměřená tvrdost všech vzorků ozubených kol na jejich povrchu činila cca 740 HV, což odpovídá cca 62 HRC. Z grafu 3-1 lze zjistit, že tvrdosti 62 HRC odpovídá koncentrace uhlíku 0,90 %.



Graf 3-1: Změna obsahu uhlíku a tvrdostí u cementovaných vrstev [25]

Dále bylo nutno stanovit koncentraci uhlíku c_1 na styku atmosféra-ozubené kolo. K tomuto účelu byla použita rovnice (3.2), ze které byla vyjádřena koncentrace uhlíku c_1 na styku sytící atmosféra-ozubené kolo v hloubce $h = 0$, viz vztah (3.3).

$$\frac{c_{(x,t)} - c_0}{c_1 - c_0} = 1 - \operatorname{erf} \left[\frac{h + \frac{D}{\beta}}{2\sqrt{D \cdot t}} \right] \quad (3.2)$$

$$c_1 = \frac{c_{(x,t)} - c_0}{1 - \operatorname{erf} \left[\frac{h + \frac{D}{\beta}}{2\sqrt{D \cdot t}} \right]} + c_0 \quad (3.3)$$

Z následující rovnice byla vypočítána hodnota chybové funkce $\text{erf}(z)$, která byla dosazena do rovnice (3.3) a byl proveden výpočet c_1 .

$$\text{erf}[z] = \left[\frac{0 + \frac{2,97 \cdot 10^{-11}}{1,49 \cdot 10^{-7}}}{2\sqrt{2,97 \cdot 10^{-11} \cdot t}} \right]$$

V případě cementační vrstvy 0,6 mm se hodnota chybové funkce $\text{erf}(z)$ v hloubce $h = 0$ rovná 0,23 a koncentrace uhlíku c_1 1,11 %.

$$\text{erf}[z]_{(0,6)} = \left[\frac{0 + \frac{2,97 \cdot 10^{-11}}{1,49 \cdot 10^{-7}}}{2\sqrt{2,97 \cdot 10^{-11} \cdot 135 \cdot 60}} \right] = 0,23$$

$$c_{1(0,6)} = \frac{0,90 - 0,19}{1 - 0,23} + 0,19 = 1,11\%$$

V případě cementační vrstvy 0,8 mm je hodnota chybové funkce $\text{erf}(z)$ v nulové hloubce 0,18 a koncentrace uhlíku c_1 1,06 %.

$$\text{erf}[z]_{(0,8)} = \left[\frac{0 + \frac{2,97 \cdot 10^{-11}}{1,49 \cdot 10^{-7}}}{2\sqrt{2,97 \cdot 10^{-11} \cdot 210 \cdot 60}} \right] = 0,18$$

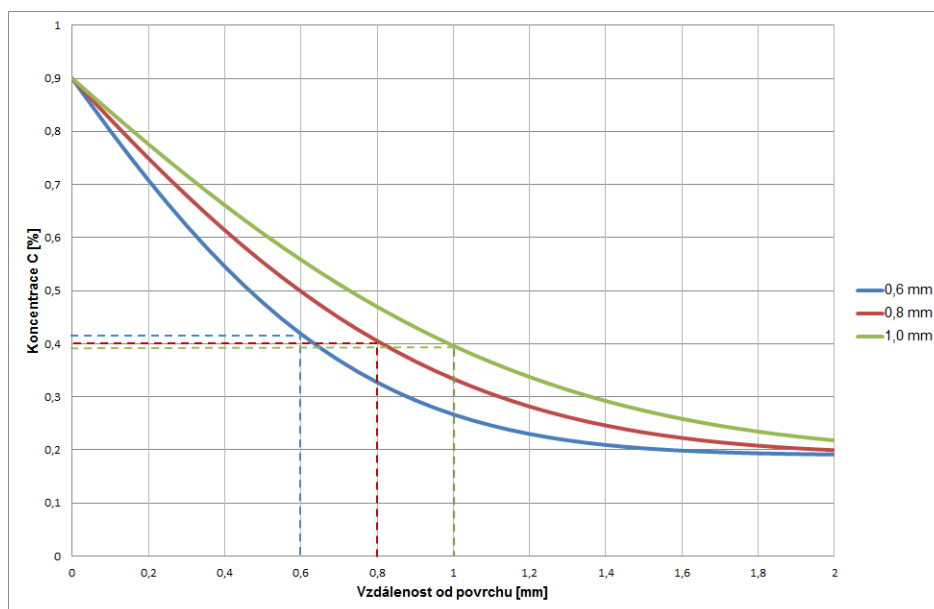
$$c_{1(0,8)} = \frac{0,90 - 0,19}{1 - 0,18} + 0,19 = 1,06\%$$

V případě cementační vrstvy 1,0 mm je hodnota chybové funkce $\text{erf}(z)$ v nulové hloubce 0,15 a koncentrace uhlíku c_1 1,03 %.

$$\text{erf}[z]_{(1,0)} = \left[\frac{0 + \frac{2,97 \cdot 10^{-11}}{1,49 \cdot 10^{-7}}}{2\sqrt{2,97 \cdot 10^{-11} \cdot 300 \cdot 60}} \right] = 0,15$$

$$c_{1(1,0)} = \frac{0,90 - 0,19}{1 - 0,18} + 0,19 = 1,03\%$$

Příslušné získané hodnoty byly dosazeny do vzorce (2.4) pro výpočet koncentrace uhlíku $c_{(x,t)}$ v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Vypočítané hodnoty koncentrace uhlíku pro hloubku cementační vrstvy 0,6 mm, 0,8 mm a 1,0 mm jsou uvedeny v příslušných tabulkách, viz přílohu I až III. Výsledné křivky koncentrace uhlíku jsou znázorněny v grafu 3-2.



Graf 3-2: Závislosti koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu

Optimální koncentrace uhlíku v cementované vrstvě dosahuje eutektoidní koncentrace, tj. 0,8 % uhlíku. Tato koncentrace s rostoucí vzdáleností od povrchu klesá. V tomto případě je koncentrace uhlíku na povrchu 0,9 %, což odpovídá obsahu uhlíku mírně nadeutektoidní oceli. Dle teoretických poznatků leží hranice cementační vrstvy do koncentrace uhlíku vyšší 0,4 %.

Jak lze vyčíst z grafu 3-2 a z příloh I až III, je koncentrace uhlíku v případě cementační vrstvy 0,6 mm (modrá křivka) v hloubce 0,6 mm pod povrchem cca 0,42 %. U cementace do 0,8 mm (červená křivka) je koncentrace uhlíku v hloubce 0,8 mm cca 0,41 % a u cementace do 1,0 mm (zelená křivka) obsahuje materiál ve vzdálenosti 1,0 mm od povrchu cca 0,40 % uhlíku.

Teoretické výpočty a z nich vyplývající koncentrace uhlíku ve sledované tloušťce nauhličené vrstvy tedy potvrzují dosažení požadované hloubky u všech tří vzorků ozubených kol.

3.4 Metalografická analýza

Potvrzení správnosti teoretických výpočtů difúze uhlíku při cementaci ozubených kol, provedených v této diplomové práci, proběhlo na základě metalografického hodnocení příslušných difúzních vrstev vzorků cementovaných kol. Za tímto účelem bylo provedeno jejich metalografické pozorování. K tomuto účelu byl použit světelný mikroskop. Vzorky ozubených kol po cementaci byly pro metalografické pozorování připraveny běžným metalografickým postupem (broušeny, leštěny a leptány).

3.4.1 Postup přípravy vzorků pro metalografické pozorování

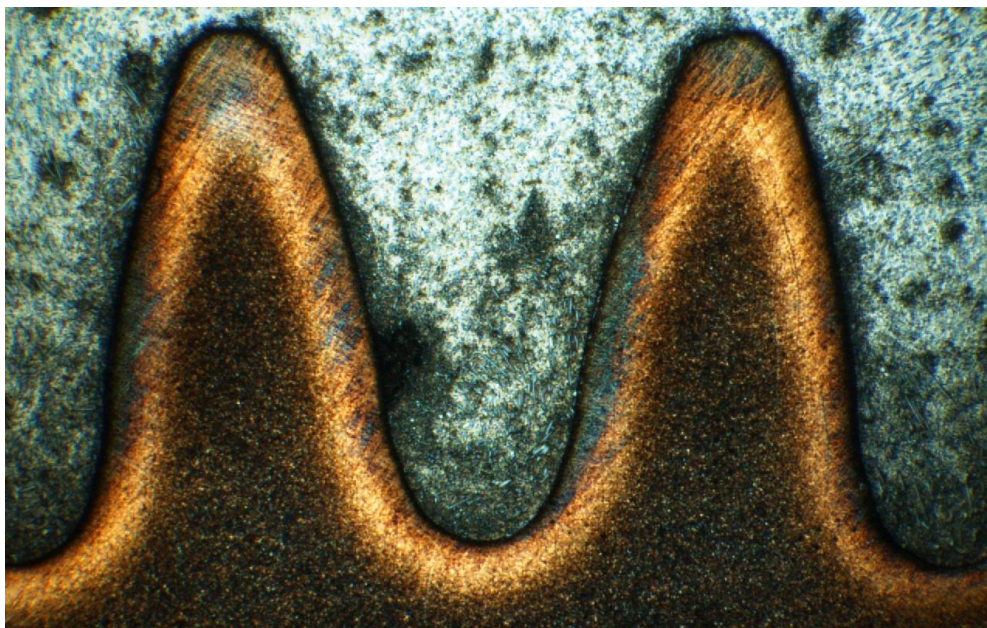
Na zařízení pro dělení vzorků Struers Discotom-2 byl proveden výřez z ozubeného kola o rozsahu cca čtyř zubů. Tento výřez byl ještě jednou říznut kolmo na zuby. Takto vzniklý vzorek byl vložen do formy pro přípravu metalografických vzorků, zkoumanou stranou dolů, a zasypán granulemi pryskyřic Isofast a Multifast. Tyto pryskyřice jsou vytvrditelné za tepla a používají se pro běžné zalisování vzorků. Na metalografickém lisu Struers CitoPress-20 byla za teploty 180 °C, působení tlaku 250 bar a za dobu 9 minut granulová hmota vytvrzena.

Vzorky byly následně vybroušeny a vyleštěny na metalografické leštičce Struers Tegrapol-35. K leštění bylo použito smáčedlo pro diamantové suspenze a diamantová suspenze se zrnky o velikosti 3 μm . Pro zviditelnění struktury byl vzorek naleptán 5% roztokem kyseliny dusičné v etanolu.



Obr. 3-3: Metalografické vzorky z hnacích kol 3. rychlosti

Ze získaných metalografických vzorků byl na světelném mikroskopu Neophot 21 v laboratoři KSP, Technické univerzity v Liberci, pořízen snímek zobrazený na obr. 3-4. Na snímku je možné vidět světlejší cementační vrstvu a tmavší jádro.

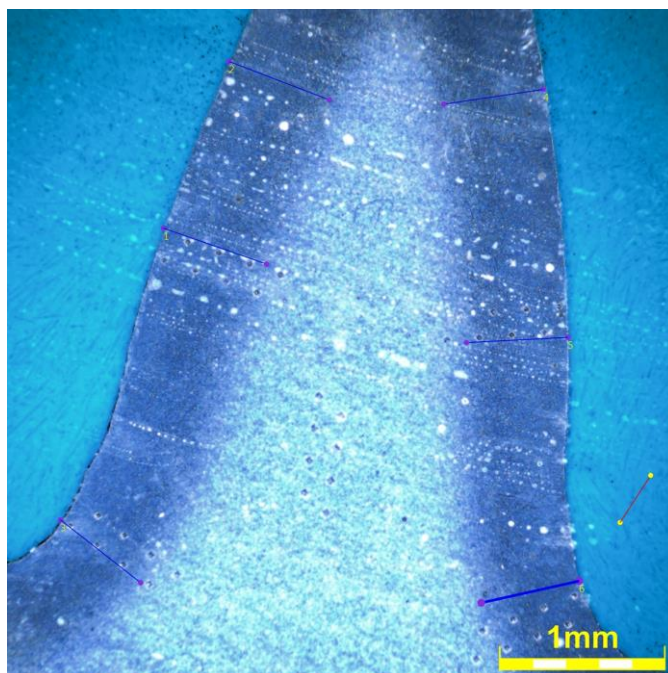


*Obr. 3-4: Cementační vrstva 0,6 mm znázorněná na mikroskopu Neophot 21,
15x zvětšeno*

3.4.2 Optické měření cementační vrstvy

Měření hloubky cementační vrstvy vzorků ozubených kol bylo založeno na získaných snímcích zubů metalografických vzorků na mikroskopu Olympus GX500, opět v laboratoři KSP, Technické univerzity v Liberci. U všech vzorků byla změřena cementační vrstva vždy z šesti míst kolmo k povrchu zubu.

U všech tří vzorků byly v průměru potvrzeny požadované cementační vrstvy 0,6 mm, 0,8 mm a 1,0 mm. Dané snímky s vyznačenými kótami a příslušné tabulky s naměřenými hodnotami a vypočítanou průměrnou hodnotou cementační vrstvy, směrodatnou odchylkou a variačním koeficientem jsou uvedeny na následujících stranách.

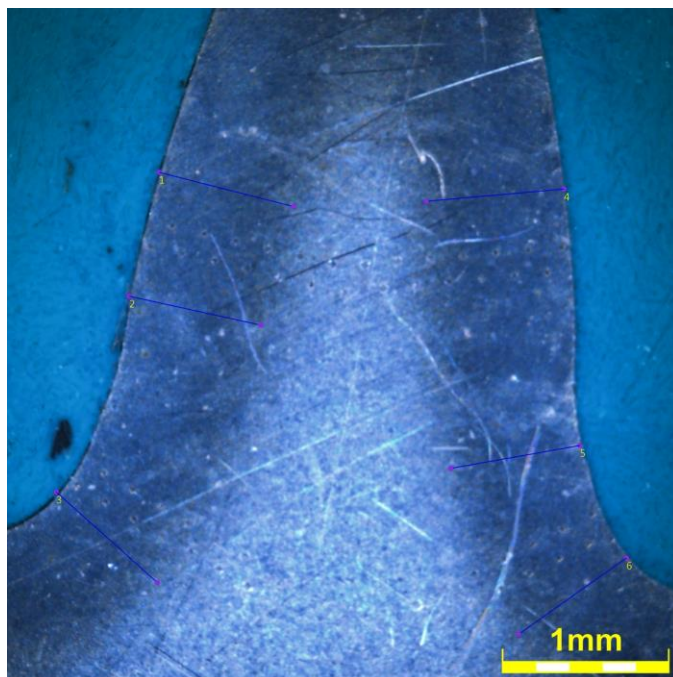


Obr. 3-5: Cementační vrstva 0,6 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500, 70x zvětšeno

Tab. 3-3: Naměřené hodnoty na mikroskopu GX500, cementační vrstva 0,6 mm

Číslo kóty	Rozměr [mm]
1	0,66
2	0,65
3	0,62
4	0,61
5	0,61
6	0,61
Průměr	0,63
Směrodatná odchylka	0,02
Variační koeficient	0,04

Jak lze vyčíst z tabulky 3-3, je průměrná naměřená hodnota 0,63 mm. Maximální naměřená hodnota je 0,66 mm a minimální 0,61 mm.

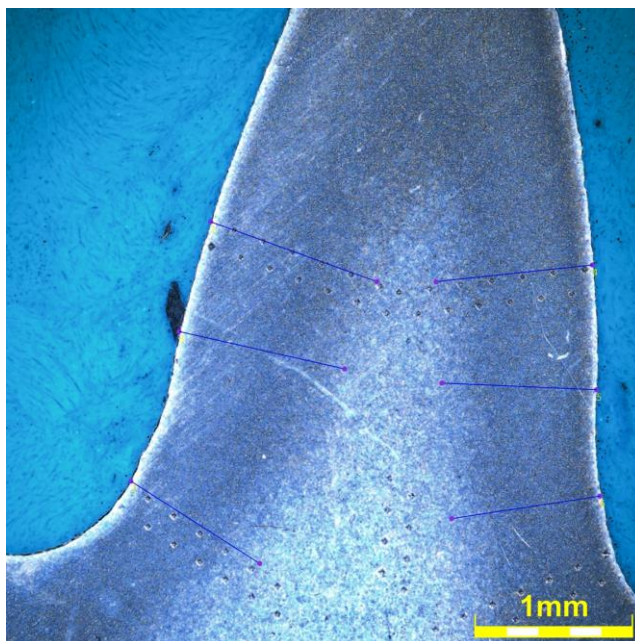


Obr. 3-6: Cementační vrstva 0,8 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500, 70x zvětšeno

Tab. 3-4: Naměřené hodnoty na mikroskopu Olympus GX500, cementační vrstva 0,8 mm

Číslo kóty	Rozměr [mm]
1	0,83
2	0,81
3	0,82
4	0,83
5	0,79
6	0,80
Průměr	0,81
Směrodatná odchylka	0,02
Variační koeficient	0,02

Jak lze vyčíst z tabulky 3-4, je průměrná naměřená hodnota 0,81 mm. Maximální naměřená hodnota je 0,84 mm a minimální 0,79 mm.



Obr. 3-7: Cementační vrstva 1,0 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500, 70x zvětšeno

Tab. 3-5: Naměřené hodnoty na mikroskopu Olympus GX500, cementační vrstva 1,0 mm

Číslo kóty	Rozměr [mm]
1	0,98
2	0,91
3	0,95
4	0,92
5	0,95
6	0,96
Průměr	0,95
Směrodatná odchylka	0,02
Variační koeficient	0,03

Jak lze vyčíst z tabulky 3-5, je průměrná naměřená hodnota 0,95 mm. Maximální naměřená hodnota je 0,98 mm a minimální 0,91 mm.

3.4.3 Určení cementační vrstvy na základě měření mikrotvrdoti

Nejpřesnější metodou pro zjištění hloubky cementace je přímé měření průběhu tvrdosti metalografického vzorku sledované části podle Vickerse. Tato metodika je popsána a upřesněna v normě ČSN EN ISO 2639 - „Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace“. Hloubka cementace (CHD) je určena mezní tvrdostí 550 HV.

Mikrotvrdot analyzovaných metalografických vzorků byla měřena na automatickém mikrotvrdoměru LECO LM247AT metodou dle Vickerse při nízkém zatížení HV1 v souladu s normou. Mikrotvrdot byla měřena ve čtyřech místech kolmo k hraně zubu - z boku zubu a paty zubu na obou stranách - a také v jádře zubu, viz vtisky diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu na obr. 3-9.

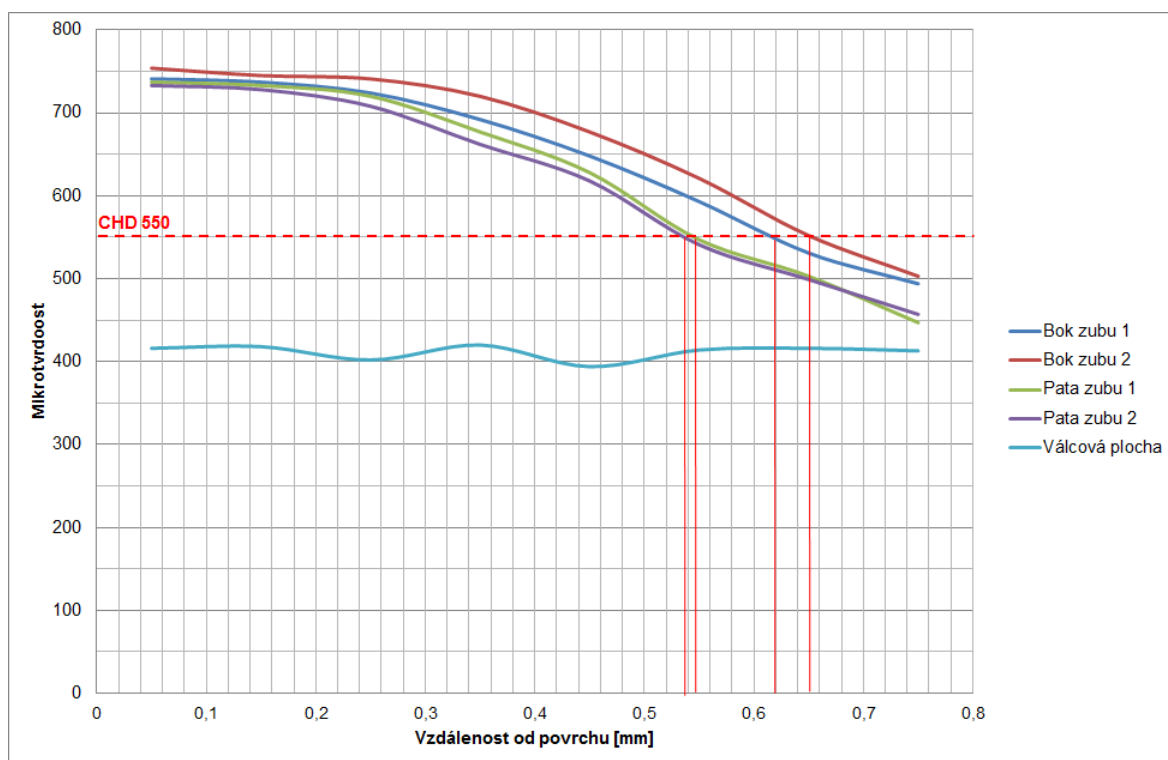
V tabulkách 3-6, 3-7 a 3-8 jsou uvedeny výsledky měření mikrotvrdoti analyzovaných metalografických vzorků v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Tyto hodnoty jsou dále znázorněny formou grafů. Vždy na posledním řádku dané tabulky je uvedena hloubka cementace, při které byla dosažena stanovená mezní tvrdost 550 HV, určující hranici cementační vrstvy.

Po vypočítání aritmetického průměru hodnot hloubky cementace byla stanovena u požadované hloubky cementace 0,6 mm hodnota 0,59 mm. U zamýšlené hloubky 0,8 mm vyšla průměrná hodnota 0,89 mm, což je odchylka 10 % od cílové hodnoty. U požadované hodnoty cementace 1 mm byla vypočítána průměrná tloušťka cementační vrstvy 0,96 mm, což je pouze o 4 % méně, než bylo cílem.

Pro shrnutí výsledků měření mikrotvrdoti dle normy ČSN EN ISO 2639 lze říci, že byla s odchylkou 2-10 % docílena požadovaná hloubka cementace.

Tab. 3-6: Hloubka cementace 0,6 mm - měření na základě mikrotvrdosti

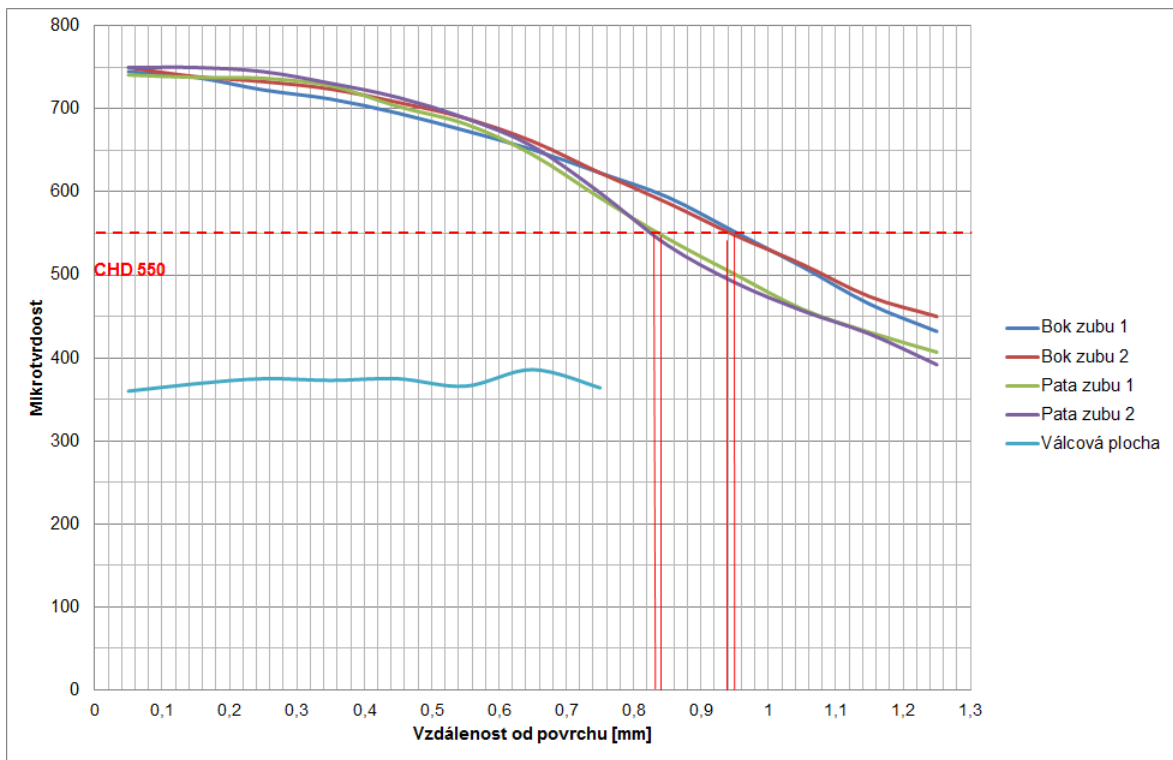
Mikrotvrdost, metoda měření HV1					
Vzdálenost [mm]	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	Jádro zubu
0,05	741	754	737	733	416
0,15	737	745	733	728	418
0,25	724	741	720	708	402
0,35	692	720	677	662	420
0,45	648	677	628	618	394
0,55	593	621	547	541	414
0,65	531	552	503	499	416
0,75	494	503	447	457	413
CHD 550 [mm]	0,62	0,65	0,55	0,54	mimo rozsah



Graf 3-3: Určení hloubky cementace (0,6 mm) dle mikrotvrdosti

Tab. 3-7: Hloubka cementace 0,8 mm - měření na základě mikrotvrdoosti

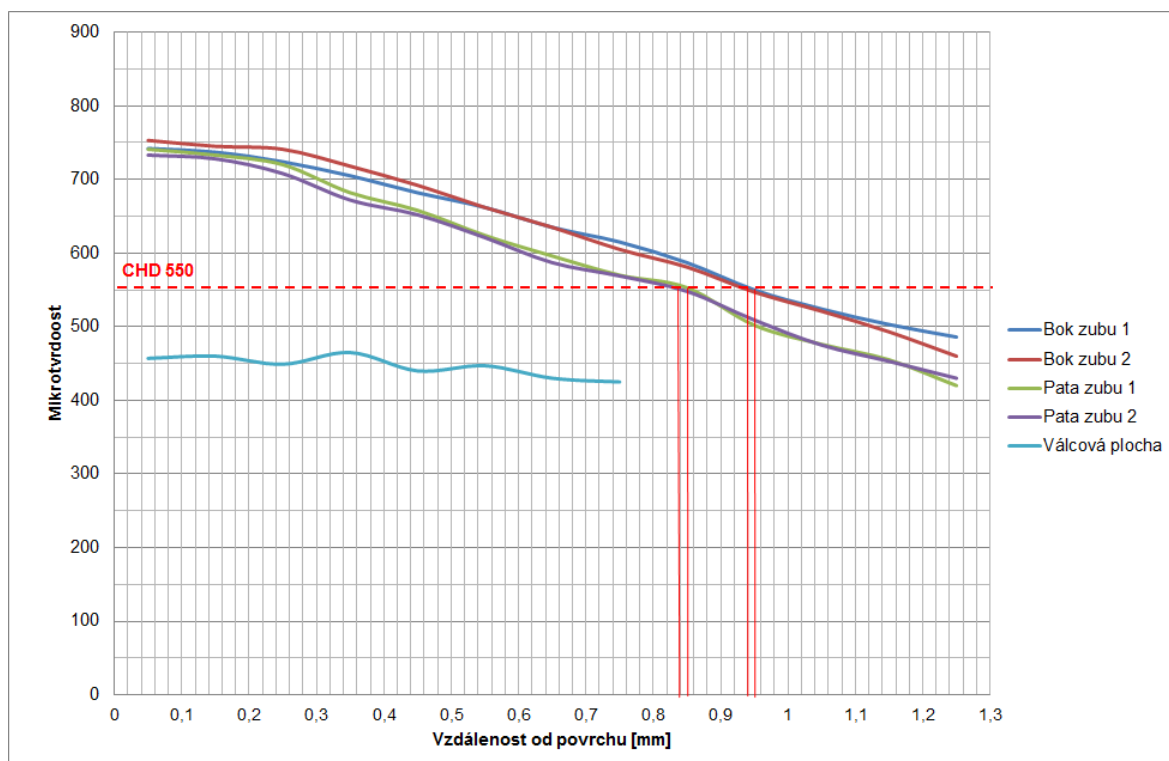
Mikrotvrdoost, metoda měření HV1					
Vzdálenost [mm]	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	Jádro zubu
0,05	745	750	741	750	360
0,15	738	739	738	750	369
0,25	723	733	737	745	375
0,35	712	724	728	731	373
0,45	695	708	703	714	375
0,55	674	689	682	689	366
0,65	651	661	645	655	386
0,75	623	623	593	599	364
0,85	594	587	544	536	
0,95	552	548	501	491	
1,05	510	513	459	457	
1,15	465	474	431	429	
1,25	432	450	407	392	
CHD 550 [mm]	0,95	0,94	0,84	0,83	mimo rozsah



Graf 3-4: Určení hloubky cementace (0,8 mm) dle mikrotvrdoosti

Tab. 3-8: Hloubka cementace 1,0 mm - měření na základě mikrotvrdosti

Vzdálenost [mm]	Mikrotvrdost, metoda měření HV1				
	Bok zubu 1	Bok zubu 2	Pata zubu 1	Pata zubu 2	Jádro zubu
0,05	742	753	741	733	457
0,15	737	745	733	728	460
0,25	724	741	720	708	449
0,35	705	718	682	672	465
0,45	682	692	658	652	440
0,55	662	662	624	621	447
0,65	635	635	596	587	430
0,75	615	605	570	569	425
0,85	587	581	553	548	
0,95	550	547	502	509	
1,05	524	521	476	475	
1,15	503	493	455	453	
1,25	486	460	420	430	
CHD 550 [mm]	0,95	0,94	0,84	0,83	mimo rozsah



Graf 3-5: Určení hloubky cementace (1,0 mm) dle mikrotvrdosti

3.4.4 Mikrostruktura cementovaných a tepelně zpracovaných vzorků

Po cementaci byla ozubená kola následně kalena v oleji o teplotě 80 °C. Zakalením oceli vznikla martenzitická struktura. Tato struktura je tvrdá, křehká a vykazuje značné vnitřní pnutí. Za účelem snížení vnitřního pnutí a tím i křehkosti je třeba ocel po kalení popouštět, [22]. V našem případě byla ozubená kola dvě hodiny popouštěna při teplotě 170 °C.

Po kalení vzniklý martenzit, tedy přesycený tuhý roztok uhlíku v železe α , má jehlicovitý tvar a je nazýván tetragonální martenzit. Při nízkoteplotním popouštění dojde uvnitř jehlic k vyloučení uhlíku v podobě nerovnovážného karbidu ϵ (Fe_2C) s těsně uspořádanou hexagonální mřížkou. V tomto stadiu vzniklý martenzit se označuje jako nízkouhlíkový kubický martenzit. Karbid ϵ precipituje především na hranicích útvarů martenzitu a má výrazný vytvrzující účinek, který z větší části kompenzuje pokles tvrdosti způsobený poklesem intersticiálního zpevnění martenzitu, [22, 23].

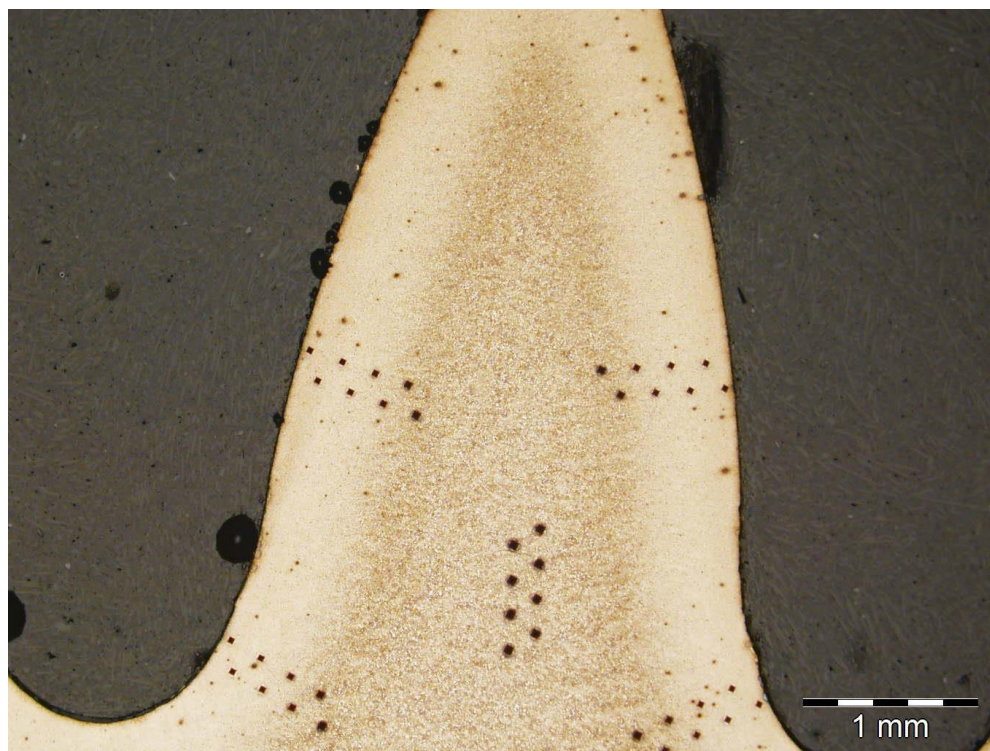
Nízkoteplotním popouštěním tedy sice dojde k mírnému poklesu tvrdosti, ale zároveň k výraznému poklesu křehkosti, [23].

V dalším kroku byly vzorky podrobeny analýze mikrostruktury na metalografickém mikroskopu Olympus GX71.

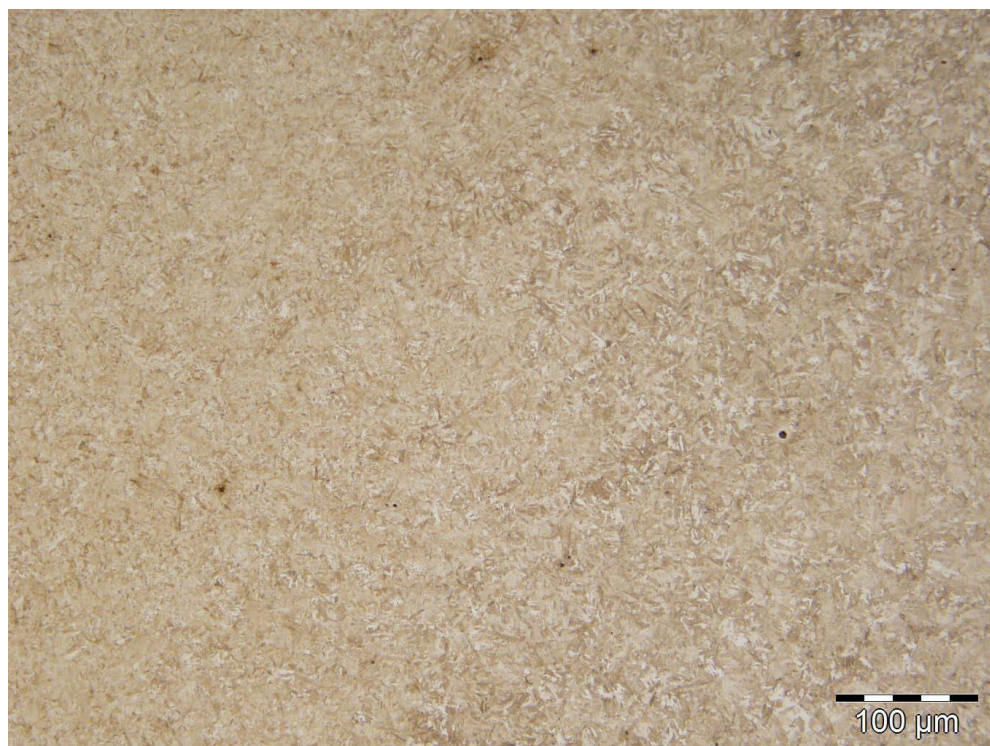
Na obr. 3-8 je mikrostruktura zubu o tloušťce cementační vrstvy 0,6 mm. Na snímku lze rozlišit světlejší nacementovanou vrstvu a tmavší jádro zubu. Dále jsou zde vidět i vtisky mikrotvrdoměru. Po orientačním změření cementační vrstvy lze potvrdit požadovaných 0,6 mm.

Na obr. 3-9 je 200x přiblížena oblast přechodu z cementační vrstvy do jádra vzorku s cementační vrstvou 0,6 mm.

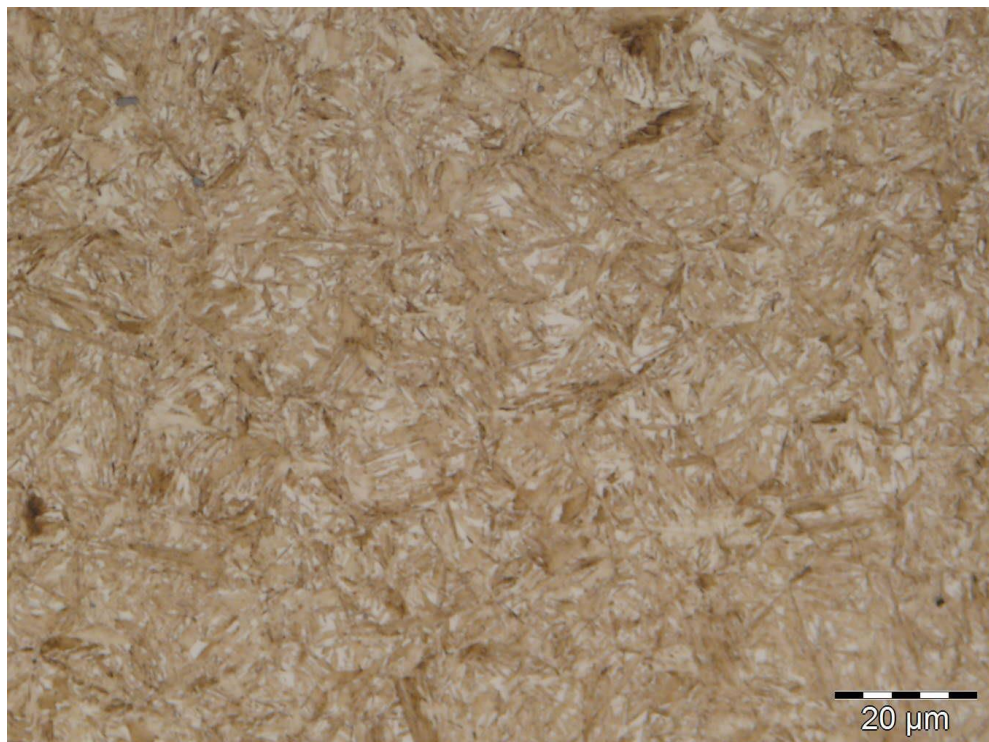
Na snímku 3-10 je tato oblast 1000x zvětšena. V levé části je martenzitická struktura, která vykazuje vysokou tvrdost, přecházející pak směrem doprava ve strukturu tvořenou převážně bainitem.



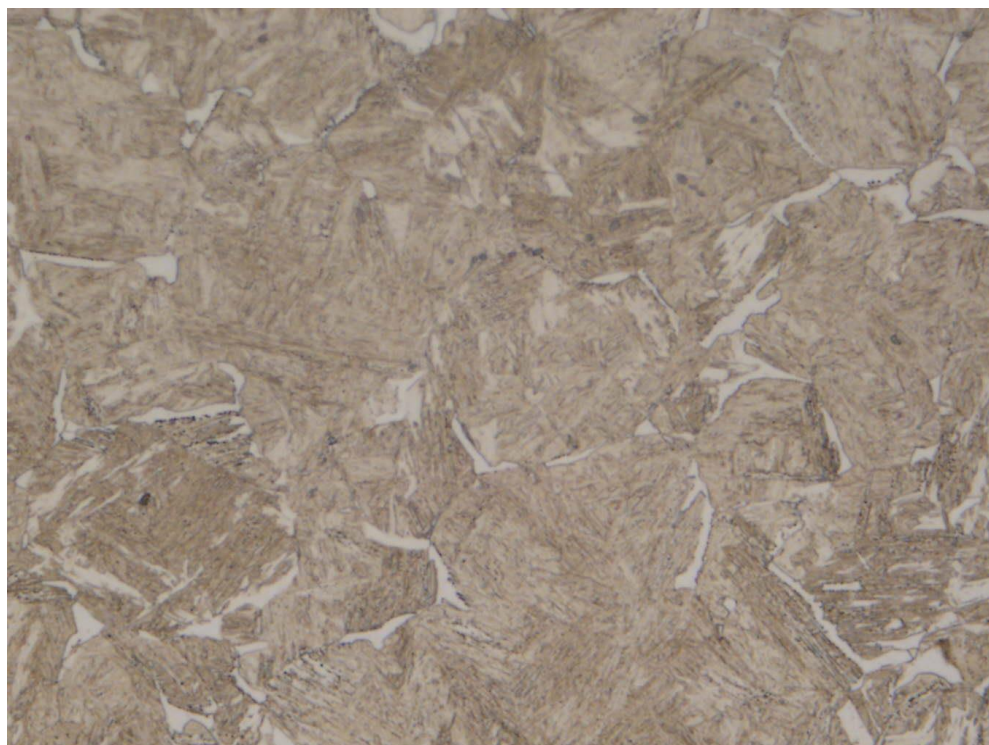
Obr. 3-8: Místa po měření tvrdosti vrstvy a jádra zubu po cementaci, kalení a popouštění, hloubka vrstvy 0,6 mm, 25x zvětšeno



Obr. 3-9: Přejímová oblast z cementační vrstvy po kalení a popouštění do vzdálenějších partií směrem k jádru, martenzit (vlevo) a bainit (vpravo), 200x zvětšeno



Obr. 3-10: Mikrostruktura cementační vrstvy po kalení a popouštění - martenzit, zbytkový austenit, 1000x zvětšeno



Obr. 3-11: Mikrostruktura jádra zubu je tvořena bainitem a feritem, 1000x zvětšeno

3.5 Vliv teploty na proces cementace

V předešlých kapitolách popsany experiment byl proveden za cementační teploty $T = 920 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro zjištění vlivu teploty na proces cementace uvažujme nyní novou teplotu cementace $T = 900 \text{ }^\circ\text{C}$.

Výpočet difúzního koeficientu D

Analogicky vypočítáme hodnotu *difúzního koeficientu* D . Po dosazení hodnot do vzorce (3.2) je hodnota difúzního koeficientu $D_{900} = 2,33 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$.

$$D_{900} = 4,0 \cdot 10^{-5} \cdot e^{-\frac{140000}{8,314(900+273)}}$$

$$D_{900} = 2,33 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Oproti difúznímu koeficientu $D_{920} = 2,97 \cdot 10^{-11} \text{ [m}^2 \cdot \text{s}^{-1}\text{]}$ při teplotě cementace $T = 920 \text{ }^\circ\text{C}$ došlo k poklesu hodnoty. To jen potvrzuje fakt, že s klesající teplotou klesá pohyblivost atomů a tím i rychlost difúze.

Výpočet koeficientu sdílení uhlíku β

Na základě křivky na obr. 2-3 vypočítáme koeficient sdílení uhlíku β . Při teplotě cementace $900 \text{ }^\circ\text{C}$ a nauhličujícím potenciálu atmosféry $c_p 1,2 \%$ má být poměr veličin $D/\beta 0,17 \text{ [mm]}$. Výsledná hodnota koeficientu sdílení uhlíku β je $1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

$$\frac{D_{900}}{\beta} = 0,17 \cdot 10^{-3} \text{ [m]}$$

$$\beta = \frac{2,33 \cdot 10^{-11}}{0,17 \cdot 10^{-3}} = 1,37 \cdot 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$$

Výpočet času cementace a koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov

Nyní spočítáme čas potřebný k dosažení stejné koncentrace uhlíku v hloubce $0,6 \text{ mm}$, $0,8 \text{ mm}$ a $1,0 \text{ mm}$ pod povrchem jako v případě teploty $920 \text{ }^\circ\text{C}$. Použijeme k tomu hodnoty koncentrace zažlucené v přílohách I až III.

Pro výpočet času potřebného pro cementaci do určité hloubky při nové teplotě máme dvě neznámé. První je čas cementace a druhou koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov.

Pro výpočet času a koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-ozubené kolo byl v programu Microsoft Excel vytvořen algoritmus (viz rovnici (3.6)), založený na závislosti cílové koncentrace uhlíku $c_{(x)}$ (3.4) v požadované vzdálenosti od povrchu ($h = 0,6$ mm, $0,8$ mm a $1,0$ mm) a koncentrace c_1 (3.5) na čase.

$$c_{(x)} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h + \frac{D}{\beta}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \cdot (c_1 + c_0) + c_0 \quad (3.4)$$

$$c_1 = \frac{c_{(h=0)} - c_0}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0 + \frac{D}{\beta}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right)} + c_0 \quad (3.5)$$

$$c_{(x)} = \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{h + \frac{D}{\beta}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right) \right] \cdot \left[\frac{c_{(h=0)} - c_0}{1 - \operatorname{erf} \left(\frac{0 + \frac{D}{\beta}}{2 \cdot \sqrt{D \cdot t}} \right)} \right] + c_0 \quad (3.6)$$

Hodnoty pro $c_{(x)}$ vyčtené z příloh I až III:

$c_{(x)}$ pro $h = 0,0006$ m = 0,42 % C

$c_{(x)}$ pro $h = 0,0008$ m = 0,41 % C

$c_{(x)}$ pro $h = 0,001$ m = 0,40 % C

Do algoritmu byly dosazovány hodnoty času do doby, než byla dosažena cílová koncentrace uhlíku v dané hloubce pod povrchem. Výsledné časy a koncentrace c_1 pro jednotlivé hloubky cementace jsou uvedeny na následující stránce.

Cementační vrstva 0,6 mm

Pro dosažení koncentrace uhlíku 0,42 % v hloubce 0,6 mm pod povrchem (viz přílohu I) při teplotě cementace 900 °C byla vypočítána potřebná doba cementace 166 minut. To je o 31 minut delší doba než u cementační teploty 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla vypočítána 1,07 %.

Cementační vrstva 0,8 mm

U cementační vrstvy 0,8 mm a požadované koncentrace uhlíku v této vzdálenosti 0,41 % vyšla potřebná doba cementace 260 minut při 900 °C. To znamená, že se čas cementace prodloužil o 50 minut oproti cementaci při teplotě 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla vypočítána 1,03 %.

Cementační vrstva 1,0 mm

V případě cementační vrstvy 1,0 mm a cílové koncentrace uhlíku 0,40 % v této hloubce je při teplotě cementace 900 °C třeba 373 minut. Tzn. nárůst doby cementace o 63 minut v porovnání s potřebným časem při teplotě 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla vypočítána 1,01 %.

Tab. 3-9: Porovnání časů cementace a koncentrace c_1 při různých teplotách

		Teplota	
		T=920 °C	T=900 °C
Hloubka 0,6 mm Cílová koncentrace: 0,42 % C	Čas t	135 min	166 min
	Koncentrace c_1	1,11 % C	1,07 % C
Hloubka 0,8 mm Cílová koncentrace: 0,41 % C	Čas t	210 min	260 min
	Koncentrace c_1	1,06 % C	1,03 %
Hloubka 1,0 mm Cílová koncentrace: 0,40 % C	Čas t	300 min	373 min
	Koncentrace c_1	1,03 % C	1,01 %

3.6 Shrnutí a diskuse výsledků

Tato diplomová práce měla za úkol propojit mé teoretické znalosti z oblasti fyzikální metalurgie – difúze kovů – s praktickými výsledky v oblasti strojírenské technologie – tepelného zpracování kovů, zaměřeného na cementaci ocelových ozubených kol.

1) V souvislosti s řešením této diplomové práce je nutno uvést, že difúzní pochody jsou důležitými technickými procesy, se kterými se setkáváme v různých oborech lidské činnosti. Základní podstata difúze vyplývá z druhého termodynamického zákona. Je spojena s mírou neuspořádanosti daného systému, který vždy zvyšuje svou entropii, čímž dospěje ke stavu s nejnižší vnitřní energií. Hybnou silou difúze je koncentrační spád, proto mají difundující látky tendenci přecházet z prostředí se svou vyšší koncentrací do prostředí se svou nižší koncentrací.

Difúze v tuhých látkách je jedinou možností přenosu hmoty. Tento proces je závislý na čase, teplotě a na velikosti difundujících atomů. Změny koncentrace probíhají v celém objemu, nebo v povrchové vrstvě a mohou být prospěšné (cementace, nitridace ocelí), ale i škodlivé (stárnutí oceli).

2) Difúze je matematicky vyjádřitelný chemický děj, který lze predikovat zjednodušenými výpočty. To je možno provést na základě řešení II. Fickova zákona a s využitím Arrheniovy rovnice. K přenosu látky, v tomto případě atomů uhlíku, je nutná především zvýšená teplota, koncentrace a tlakové poměry (předpokládáme, že tlak je konstantní).

Výpočty difúze provedené v této diplomové práci byly realizovány na základě známých procesních veličin cementace, jako je počáteční obsah uhlíku ve vstupním materiálu $c_0 = 0,19 \%$, teplota cementace $T = 920 \text{ }^\circ\text{C}$, uhlíkový potenciál nasycující atmosféry $c_p = 1,2 \%$ a časy cementace. Pro přesnější výpočet difúze byl uvažován i tzv. přestupový koeficient sdílení uhlíku β . Tento koeficient byl dopočítán na základě obr. 2-3.

Vycházelo se z teoretických poznatků, že hranice cementační vrstvy leží do koncentrace uhlíku vyšší 0,4 %. Jak je patrné z grafu 3-2 a z příloh I až III, je koncentrace uhlíku v případě cementační vrstvy 0,6 mm v hloubce 0,6 mm pod povrchem cca 0,42 %. U cementace do 0,8 mm je koncentrace uhlíku v hloubce 0,8 mm cca 0,41 % a u cementace do 1,0 mm obsahuje materiál ve vzdálenosti 1,0 mm od povrchu cca 0,40 % uhlíku.

Současně pro názornou demonstraci vlivu teploty na proces cementace byly výpočty provedeny pro případ poklesu cementační teploty o 20 °C na 900 °C. Při nižší teplotě cementace stouply časy nutné k dosažení stejné koncentrace uhlíku ve sledovaných vzdálenostech od povrchu. Pro dosažení cementační vrstvy 0,6 mm se prodloužil čas cementace o 31 minut - ze 135 na 166 minut. V případě cementační hloubky 0,8 mm stoupl čas o 50 minut - z 210 na 260 minut. U cementace do hloubky 1,0 mm byla při snížené teplotě doba cementace o 63 minut delší než při teplotě o 20 °C vyšší. Prodloužení doby cementace při nižší teplotě jen potvrzuje přímý vliv teploty na difúzní koeficient a tím na rychlost difúze. Rychlost difúze je přímo úměrná cementační teplotě.

Teoretické výpočty a z nich vyplývající koncentrace uhlíku ve sledované vzdálenosti od povrchu tedy potvrzují dosažení požadované hloubky cementace u všech tří vzorků ozubených kol.

3) V návaznosti na provedené výpočty difúze uhlíku při cementaci ozubených kol byl proveden a analyzován experiment, při němž byla nauhličena ozubená kola vyrobená z oceli ČSN 14 220 do třech hloubek cementační vrstvy - 0,6 mm, 0,8 mm a 1,0 mm. Tato kola byla po cementaci následně zakalena a popuštěna. Pro ověření hloubky cementační vrstvy byly provedeny dříve uvedené teoretické výpočty difúze uhlíku a i výpočty dokládající vliv teploty na proces cementace. Vyhodnocení hloubky cementační vrstvy cementovaných vzorků ozubených kol bylo provedeno na základě metalografického pozorování struktury vzorků a měření jejich mikrotvrdomosti.

Pro metalografické pozorování byly připraveny vzorky, které byly podrobeny optickému měření cementační vrstvy na mikroskopu Olympus GX500 v laboratoři KSP Technické univerzity v Liberci. U všech vzorků byla změřena cementační vrstva vždy z šesti míst kolmo k povrchu zubu. U požadované cementační hloubky 0,6 mm vyšla průměrná hloubka 0,63 mm. V případě cementační vrstvy 0,8 mm vyšla po optickém měření průměrná hodnota 0,81 mm. Výsledkem optického měření vzorku cementovaného do hloubky 1,0 mm je průměrná hodnota 0,95 mm.

Optické měření cementační vrstvy potvrdilo s mírnými odchylkami dosažení požadovaných cementačních vrstev. Je třeba ale zmínit, že se jedná spíše o orientační a nepřiliš přesnou metodu měření cementační vrstvy.

Dále byla za účelem stanovení nadifundované vrstvy na automatickém mikrotvrdoměru LECO LM247AT měřena mikrotvrdomost na zubu metodou dle Vickerse při nízkém zatížení HV1 v souladu s normou ČSN EN ISO 2639. Tato metoda je

nejpřesnější metodou pro určení cementační vrstvy a je definována normou ČSN EN ISO 2639 - „Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace“. Hloubka cementace (CHD) je určena mezní tvrdostí 550 HV.

Mikrotvrdost byla měřena ve čtyřech místech kolmo k hraně zubu - z boku zubu a paty zubu na obou stranách zubu - a také v jádře zubu, viz vtisky diamantového pravidelného čtyřbokého jehlanu na obr. 3-9.

V tabulkách 3-6, 3-7 a 3-8 jsou uvedeny výsledky měření mikrotvrdosti analyzovaných metalografických vzorků v závislosti na vzdálenosti od povrchu. Tyto hodnoty jsou dále znázorněny formou grafů.

Po vypočítání aritmetického průměru hodnot hloubky cementace vyšla u požadované hloubky cementace 0,6 mm hodnota 0,59 mm. U zamýšlené hloubky 0,8 mm vyšla průměrná hodnota 0,89 mm, což je odchylka 10 % od cílové hodnoty. U požadované hodnoty cementace 1 mm byla vypočítána průměrná tloušťka cementační vrstvy 0,96 mm, což je pouze o 4 % méně, než bylo cílem.

Pro shrnutí výsledků měření mikrotvrdosti dle normy ČSN EN ISO 2639 lze říci, že byla s odchylkou 2-10 % docílena požadovaná hloubka cementace.

4) Metalografické hodnocení mikrostruktury vzorků ozubených kol po cementaci, kalení a popouštění bylo provedeno na metalografickém mikroskopu Olympus GX71. Před cementací byla mikrostruktura vstupního materiálu tvořena feritem a perlitem, jak vyplývá z rovnovážného diagramu Fe-C metastabilní soustavy pro ocel s obsahem uhlíku 0,2 % a z metalografického pozorování ozubených kol před cementací a následným kalením a popouštěním.

Po cementaci a následném tepelném zpracování – kalení v oleji o teplotě 80 °C a popouštění při teplotě 170 °C – je mikrostruktura cementační vrstvy zubu tvořena martenzitem a zbytkovým austenitem, což je typické pro rychlé ochlazení, které je realizováno kalením oceli. Při martenzitické přeměně nedifunduje ani uhlík ani železo. Ukazuje se, že v jádře zubu (tj. ve vzdálenějších partiích od hlavy zubu) nebyla dosažena taková intenzita ochlazování při kalení, proto je jádro zubu tvořeno převážně bainitem. Bainit je získán polodifúzním procesem, pouze difúzí uhlíku (železo nedifunduje).

Celkově je možno konstatovat, že provedené teoretické výpočty difúze uhlíku korespondují s podmínkami praktické difúze uhlíku při cementaci oceli ČSN 14 220.

4. ZÁVĚR

Diplomová práce zpracovaná na téma: „**Difúzní pochody v technologii výroby ozubených kol cementováním**“ řeší velmi aktuální téma. Práce je rozdělena do dvou základních částí – teoretické a praktické. V teoretické části je popsána problematika difúzních pochodů v kovech a jsou zde uvedeny důležité vztahy pro výpočet difúzních pochodů, jako je Arrheniova rovnice a dva Fickovy zákony. Dále je v rešerši popsána cementace ozubených kol, tzn. sycení povrchu oceli uhlíkem. Toto sycení zvyšuje množství uhlíku v oceli, kterou je pak možno efektivním způsobem tepelně zpracovat – kalit a popouštět.

Experimentální část této diplomové práce je rozdělena na dvě části. První část obsahuje teoretické výpočty difúze uhlíku, které odpovídají podmínkám pro cementaci ozubených kol. Druhou částí experimentů je provedení cementace (nauhličení ozubených kol). Tato kola byla cementována do třech hloubek (0,6 mm, 0,8 mm a 1 mm). Kola byla následně kalena a popouštěna.

Na základě provedeného řešení diplomové práce je možno formulovat tyto dílčí závěry:

- 1) Provedená rešerše dostatečným způsobem umožnila následné řešení experimentů, především výpočet průběhu difúze v materiálu ozubených kol - v oceli ČSN 14 220.
- 2) Při difúzním výpočtu cementační vrstvy 0,6 mm bylo doloženo, že pro dosažení potřebné koncentrace uhlíku 0,42 % v hloubce 0,6 mm pod povrchem při teplotě cementace 900 °C je třeba 166 minut. To je o 31 minut delší doba cementace než u cementační teploty 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla stanovena 1,11 %.

Při difúzním výpočtu cementační vrstvy 0,8 mm s požadovanou koncentrací uhlíku v této vzdálenosti 0,41 %, byla vypočítána při teplotě 900 °C potřebná doba cementace 260 minut. To znamená, že se čas cementace prodloužil o 50 minut oproti cementaci při teplotě 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla stanovena 1,06 %.

Při difúzním výpočtu cementační vrstvy 1,0 mm s potřebnou koncentrací uhlíku 0,40 % byla v této hloubce při teplotě cementace 900 °C vypočítána doba cementace 373 minut, což je nárůst doby cementace o 63 minut v porovnání

s potřebným časem při teplotě 920 °C. Koncentrace uhlíku c_1 na styku atmosféra-kov byla stanovena 1,03 %.

- 3) Měření mikrotvrdomosti zubů kola se ukazuje být poměrně dobře vypovídající metodou pro zjištění hloubky cementace. Jak je obecně známo a zde bylo také potvrzeno, že k tomuto účelu je vhodná metoda podle Vickerse, která se provádí na příslušném metalografickém vzorku (metodika je popsána a upřesněna v normě ČSN EN ISO 2639 - „Ocel - Stanovení a ověření hloubky cementace“, hloubka cementace, CHD, je určena mezní tvrdostí 550 HV). Pro tento účel byl vhodný a také použitý mikrotvrdoměr LECO LM247AT při nízkém zatížení HV1 (zatížení 10 N) v souladu s normou. Hodnoty mikrotvrdomosti se pohybují od 754 do 550 HV1.

Výpočtem aritmetického průměru hodnot hloubky cementace pro jednotlivé experimenty dosahovaly hodnoty u požadované hloubky cementace 0,6 mm hodnoty 0,59 mm. U zamýšlené hloubky 0,8 mm průměrná hodnota činí 0,89 mm, což je odchylka 10 % od cílové hodnoty. U požadované hodnoty cementace 1 mm byla vypočítána průměrná tloušťka cementační vrstvy 0,96 mm, což je pouze o 4 % méně, než bylo cílem.

- 4) Sledováním struktury cementovaných a tepelně zpracovaných ozubených kol bylo potvrzeno, že cementací, kalením a popouštěním bylo dosaženo martenzitické struktury s určitým množstvím zbytkového austenitu. Přejížděcí oblast z cementační vrstvy do vzdálenějších partií směrem k jádru zubu kola je tvořena martenzitem a bainitem. Mikrostruktura jádra zubu směrem od povrchu je tvořena bainitem a feritem.
- 5) Ekonomické hodnocení diplomové práce nebylo provedeno, neboť tato práce svým zařazením spadá do teoretického výzkumu.
- 6) Pro další řešení diplomové práce doporučuji věnovat pozornost dalším zpřesněným výpočtům difuzních pochodů.

Seznam použité literatury

- [1] BODYCOTE PLC. *Tepelné zpracování*. [online]. [vid. 18.4.2016]. Dostupné na: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment/case-hardening-with-subsequent-hardening-operation/low-pressure-carburising-lpc.aspx>
- [2] DAĐOUREK Karel. Vybrané technologie povrchových úprav. 2006. [online]. [vid. 10.3.2016]. Dostupné na: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/08cementace.pdf
- [3] LABÍK Stanislav a kol. *Příklady z fyzikální chemie online*. [online]. [vid. 15.3.2016]. Dostupné z: <http://old.vscht.cz/fch/prikladnik/prikladnik/p.9.1.html>
- [4] MACHUTA Jiří, NOVÁ Iva. *Fyzikální metalurgie - návody na cvičení*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015, ISBN 978-80-7494-197-9.
- [5] Projekt „Učíme v prostoru“. *Tepelné zpracování kovů*. [online]. [vid. 26.3.2016]. Dostupné na: http://uvp3d.cz/drtic/?page_id=2888.
- [6] Příklady z fyzikální chemie. [online]. [vid. 22.5.2016]. Dostupné na: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska3_6c2.pdf
- [7] VOJTĚCH Dalibor. *Kovové materiály*. 1. vyd. Vysoká škola chemicko- technologická v Praze, Praha 2006. ISBN 80-7080-600-1.
- [8] VŘEŠŤÁL J., SOPOUŠEK J., BROŽ P. *Chemicko-tepelné zpracování materiálů*. [online]. [vid. 20.4.2016]. Dostupné na: http://www.sci.muni.cz/chemsekce/c8870/pdf/Uloha6_Chemtepzprac.pdf
- [9] Difúze. [online]. [vid. 18.4.2016]. Dostupné na: <http://www.wikiskripta.eu/index.php/Difuze>
- [10] Chemicko-tepelné zpracování. [online]. [vid. 10.5.2016]. Dostupné na: coptel.coptkm.cz
- [11] Tepelné zpracování. [online]. [vid. 10.5.2016]. Dostupné na: <http://tzs.kmm.zcu.cz/tepel2.pdf>

- [12] KONSTRUOVÁNÍ STROJŮ. Převody. Přednáška 3. Fakulta strojního inženýrství VUT v Brně. Ústav konstruování. [online]. [vid. 15.6.2016]. Dostupné na: http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/6C2/prednasky/prednaska3_6c2.pdf
- [13] HAZLINGER Marián, MORAVČÍK Roman. *Chemicko-tepelné spracovanie materiáloví*. Slovenská Technická univerzita v Bratislavě, 2013, ISBN 978-80-227-3924-5.
- [14] NOVÁ Iva. *Fyzikální metalurgie*, přednáška č. 13. Technická univerzita v Liberci.
- [15] SODOMKA, Jaromír. *Nauka o materiálu. Struktury kovových materiálů*. ČVUT v Praze. [online]. [vid. 04.04.2017]. Dostupné na: <https://www.fd.cvut.cz/personal/sodomjar/nauka%20o%20materialu.pdf>.
- [16] Materiály vhodné pro výrobu ozubených kol. [online]. [vid. 12.02.2017]. Dostupné na: <http://mlgeardesigns.blog.cz/1310/materialy-vhodne-pro-vyrobu-celnich-ozubenych-kol>.
- [17] Protokol o zkoušce č. 00252/02-2017. Metalurgická laboratoř PKG/5. Mladá Boleslav. Petr Venera. 16.01.2017.
- [18] KARABELCHTCHIKOVA, Olga. *Fundamentals of Mass Transfer in Gas Carburizing*. Worcester, USA, 2007. Disertační práce. WORCESTER POLYTECHNIC INSTITUTE
- [19] WYSS, U. *Die Wärmebehandlung der Bau- und Werkzeugstähle*. BAZ Buchverlag. Basel. 1978. ISBN 3858150401.
- [20] CEMENTOVÁNÍ. [online]. [vid. 15.12.2016]. Dostupné na: <https://www.opi.zcu.cz/download/cementovani.pdf>.
- [21] Ústav materiálového inženýrství. PROJEKT I. [online]. [vid. 15.10.2016]. Dostupné na: <http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/10/projektn.pdf>
- [22] Kalení a popouštění. [online]. [vid. 15.02.2016]. Dostupné na: <http://www.elitalyceca.wz.cz/files/tep/tep07.pdf>
- [23] CHOTĚBORSKÝ Rostislav, HRABĚ Petr. *Změna mechanických vlastností při popouštění*. MM Průmyslové spektrum. 14.06.2016. [online]. [vid. 20.02.2017].

Dostupné na: <http://www.mmspektrum.com/clanek/zmena-mechanickych-vlastnosti-pri-popousteni.html>

- [24] Transformační diagramy rozpadu přechlazeného austenitu. [online]. [vid. 04.04.2017]. Dostupné na: <http://slideplayer.cz/slide/2863734/>.
- [25] KRAUS, Václav. *Tepelné zpracování a slinování. Cvičení*. Západočeská univerzita v Plzni. 18.10.2013. ISBN 978-80-261-0260-1.

Seznam obrázků

Obr. 2-1: Difúze částic z místa o vyšší koncentraci do místa s nižší koncentrací [9]	10
Obr. 2-2: Závislost aktivační energie na mechanismu difúze [9].....	12
Obr. 2-3: Hodnoty D/β pro cementaci v plynu [19].....	15
Obr. 2-4: Závislost koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu	16
Obr. 2-5: Typy syčení povrchu dle syťícího prvku [1].....	18
Obr. 2-6: Model pochodů při cementaci v plynu	20
Obr. 2-7: Druhy cementace dle použitého média	22
Obr. 2-8: Kalící teploty [5]	26
Obr. 2-9: Druhy kalení po cementování [13].....	27
Obr. 2-10: Diagram ARA s vyznačením různých způsobů kalení [24]	27
Obr. 2-11: Diagram anizotermického rozpadu austenitu pro ocel ČSN 14 220 [21].....	28
Obr. 3-1: Ozubené kolo 3. rychlosti.....	29
Obr. 3-2: Chemicko-tepelně zpracovaná hnací kola 3. rychlosti.....	32
Obr. 3-3: Metalografické vzorky z hnacích kol 3. rychlosti	36
Obr. 3-4: Cementační vrstva 0,6 mm znázorněná na mikroskopu Neophot 21, 15x zvětšeno	37
Obr. 3-5: Cementační vrstva 0,6 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500,	38
Obr. 3-6: Cementační vrstva 0,8 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500,	39
Obr. 3-7: Cementační vrstva 1,0 mm znázorněná na mikroskopu Olympus GX500, 70x zvětšeno	40
Obr. 3-8: Místa po měření tvrdosti vrstvy a jádra zubu po cementaci, kalení a popouštění, hloubka vrstvy 0,6 mm, 25x zvětšeno	46
Obr. 3-9: Přejímová oblast z cementační vrstvy po kalení a popouštění do vzdálenějších partií směrem k jádru, martenzit (vlevo) a bainit (vpravo), 200x zvětšeno	46
Obr. 3-10: Mikrostruktura cementační vrstvy po kalení a popouštění - martenzit, zbytkový austenit, 1000x zvětšeno	47
Obr. 3-11: Mikrostruktura jádra zubu je tvořena bainitem a feritem, 1000x zvětšeno	47

Seznam tabulek

Tab. 2-1: Hodnoty difúzního koeficientu pro prvky v železe [4].....	12
Tab. 2-2: Hodnoty chybové funkce erf(z)	17
Tab. 3-1: Chemické složení oceli ČSN 14 220	30
Tab. 3-2: Hodnoty sytícího potenciálu a času	31
Tab. 3-3: Naměřené hodnoty na mikroskopu GX500, cementační vrstva 0,6 mm	38
Tab. 3-4: Naměřené hodnoty na mikroskopu Olympus GX500, cementační vrstva 0,8 mm	39
Tab. 3-5: Naměřené hodnoty na mikroskopu Olympus GX500, cementační vrstva 1,0 mm	40
Tab. 3-6: Hloubka cementace 0,6 mm - měření na základě mikrotvrdomosti	42
Tab. 3-7: Hloubka cementace 0,8 mm - měření na základě mikrotvrdomosti	43
Tab. 3-8: Hloubka cementace 1,0 mm - měření na základě mikrotvrdomosti	44
Tab. 3-9: Porovnání časů cementace a koncentrace c_1 při různých teplotách.....	50

Seznam grafů

Graf 2-1: Chybová funkce erf(z).....	17
Graf 3-1: Změna obsahu uhlíku a tvrdostí u cementovaných vrstev [25]	33
Graf 3-2: Závislosti koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu	35
Graf 3-3: Určení hloubky cementace (0,6 mm) dle mikrotvrdomosti.....	42
Graf 3-4: Určení hloubky cementace (0,8 mm) dle mikrotvrdomosti.....	43
Graf 3-5: Určení hloubky cementace (1,0 mm) dle mikrotvrdomosti.....	44

Příloha I: Výpočtová tabulka závislosti koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu, hloubka cementace 0,6 mm

h [m]	x [mm]	z	erf (z)	1-erf (z)	C [%]
0	0,000199	0,20319801	0,226167	0,773833	0,9
0,00005	0,000249	0,254168555	0,28074	0,71926	0,849929
0,0001	0,000299	0,3051391	0,333918	0,666082	0,801137
0,00015	0,000349	0,356109644	0,385468	0,614532	0,75384
0,0002	0,000399	0,407080189	0,435181	0,564819	0,708228
0,00025	0,000449	0,458050734	0,482874	0,517126	0,664469
0,0003	0,000499	0,509021278	0,528392	0,471608	0,622706
0,00035	0,000549	0,559991823	0,571609	0,428391	0,583053
0,0004	0,000599	0,610962368	0,612429	0,387571	0,5456
0,00045	0,000649	0,661932912	0,650786	0,349214	0,510408
0,0005	0,000699	0,712903457	0,68664	0,31336	0,477511
0,00055	0,000749	0,763874002	0,719983	0,280017	0,446919
0,0006	0,000799	0,814844547	0,750829	0,249171	0,418618
0,00065	0,000849	0,865815091	0,779217	0,220783	0,392571
0,0007	0,000899	0,916785636	0,805207	0,194793	0,368724
0,00075	0,000949	0,967756181	0,82888	0,17112	0,347004
0,0008	0,000999	1,018726725	0,85033	0,14967	0,327324
0,00085	0,001049	1,06969727	0,869665	0,130335	0,309584
0,0009	0,001099	1,120667815	0,887003	0,112997	0,293676
0,00095	0,001149	1,171638359	0,90247	0,09753	0,279485
0,001	0,001199	1,222608904	0,916196	0,083804	0,266891
0,00105	0,001249	1,273579449	0,928315	0,071685	0,255772
0,0011	0,001299	1,324549993	0,938959	0,061041	0,246006
0,00115	0,001349	1,375520538	0,948259	0,051741	0,237473
0,0012	0,001399	1,426491083	0,956342	0,043658	0,230056
0,00125	0,001449	1,477461627	0,963332	0,036668	0,223643
0,0013	0,001499	1,528432172	0,969346	0,030654	0,218126
0,00135	0,001549	1,579402717	0,974491	0,025509	0,213404
0,0014	0,001599	1,630373261	0,978872	0,021128	0,209385
0,00145	0,001649	1,681343806	0,982583	0,017417	0,205981
0,0015	0,001699	1,732314351	0,985709	0,014291	0,203112
0,00155	0,001749	1,783284895	0,988329	0,011671	0,200708
0,0016	0,001799	1,83425544	0,990514	0,009486	0,198703
0,00165	0,001849	1,885225985	0,992327	0,007673	0,19704
0,0017	0,001899	1,93619653	0,993822	0,006178	0,195668
0,00175	0,001949	1,987167074	0,99505	0,00495	0,194542
0,0018	0,001999	2,038137619	0,996053	0,003947	0,193621
0,00185	0,002049	2,089108164	0,996868	0,003132	0,192874
0,0019	0,002099	2,140078708	0,997526	0,002474	0,19227
0,00195	0,002149	2,191049253	0,998056	0,001944	0,191784
0,002	0,002199	2,242019798	0,998479	0,001521	0,191395
0,00205	0,002249	2,292990342	0,998816	0,001184	0,191086
0,0021	0,002299	2,343960887	0,999083	0,000917	0,190841

Příloha II: Výpočtová tabulka závislosti koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu, hloubka cementace 0,8 mm

h [m]	x [mm]	z	erf (z)	1-erf (z)	C [%]
0	0,000199	0,162920858	0,182223	0,817777	0,9
0,00005	0,000249	0,203788211	0,226806	0,773194	0,861292
0,0001	0,000299	0,244655564	0,270654	0,729346	0,823224
0,00015	0,000349	0,285522917	0,313633	0,686367	0,785909
0,0002	0,000399	0,326390271	0,355621	0,644379	0,749454
0,00025	0,000449	0,367257624	0,396505	0,603495	0,713959
0,0003	0,000499	0,408124977	0,436179	0,563821	0,679513
0,00035	0,000549	0,44899233	0,474553	0,525447	0,646197
0,0004	0,000599	0,489859684	0,511544	0,488456	0,614081
0,00045	0,000649	0,530727037	0,547083	0,452917	0,583226
0,0005	0,000699	0,57159439	0,581115	0,418885	0,553679
0,00055	0,000749	0,612461743	0,613593	0,386407	0,525481
0,0006	0,000799	0,653329096	0,644486	0,355514	0,49866
0,00065	0,000849	0,69419645	0,673773	0,326227	0,473233
0,0007	0,000899	0,735063803	0,701445	0,298555	0,449208
0,00075	0,000949	0,775931156	0,727504	0,272496	0,426583
0,0008	0,000999	0,816798509	0,751962	0,248038	0,405349
0,00085	0,001049	0,857665862	0,774841	0,225159	0,385485
0,0009	0,001099	0,898533216	0,796171	0,203829	0,366966
0,00095	0,001149	0,939400569	0,815991	0,184009	0,349758
0,001	0,001199	0,980267922	0,834347	0,165653	0,333821
0,00105	0,001249	1,021135275	0,85129	0,14871	0,319111
0,0011	0,001299	1,062002629	0,866877	0,133123	0,305579
0,00115	0,001349	1,102869982	0,881168	0,118832	0,293171
0,0012	0,001399	1,143737335	0,894227	0,105773	0,281833
0,00125	0,001449	1,184604688	0,906121	0,093879	0,271506
0,0013	0,001499	1,225472041	0,916918	0,083082	0,262132
0,00135	0,001549	1,266339395	0,926687	0,073313	0,253651
0,0014	0,001599	1,307206748	0,935494	0,064506	0,246004
0,00145	0,001649	1,348074101	0,94341	0,05659	0,239132
0,0015	0,001699	1,388941454	0,9505	0,0495	0,232976
0,00155	0,001749	1,429808808	0,956829	0,043171	0,227481
0,0016	0,001799	1,470676161	0,962461	0,037539	0,222592
0,00165	0,001849	1,511543514	0,967454	0,032546	0,218256
0,0017	0,001899	1,552410867	0,971868	0,028132	0,214424
0,00175	0,001949	1,59327822	0,975756	0,024244	0,211049
0,0018	0,001999	1,634145574	0,979169	0,020831	0,208086
0,00185	0,002049	1,675012927	0,982155	0,017845	0,205493
0,0019	0,002099	1,71588028	0,98476	0,01524	0,203232
0,00195	0,002149	1,756747633	0,987024	0,012976	0,201266
0,002	0,002199	1,797614987	0,988985	0,011015	0,199564
0,00205	0,002249	1,83848234	0,990678	0,009322	0,198094
0,0021	0,002299	1,879349693	0,992135	0,007865	0,196829
0,00215	0,002349	1,920217046	0,993384	0,006616	0,195744
0,0022	0,002399	1,961084399	0,994452	0,005548	0,194816

Příloha III: Výpočtová tabulka závislosti koncentrace uhlíku na vzdálenosti od povrchu, hloubka cementace 1,0 mm

h [m]	x [mm]	z	erf (z)	1-erf (z)	C [%]
0	0,000199	0,136309369	0,152861	0,847139	0,9
0,00005	0,000249	0,17050145	0,190542	0,809458	0,868419
0,0001	0,000299	0,204693531	0,227786	0,772214	0,837204
0,00015	0,000349	0,238885612	0,264513	0,735487	0,806423
0,0002	0,000399	0,273077693	0,300644	0,699356	0,776141
0,00025	0,000449	0,307269773	0,336107	0,663893	0,746419
0,0003	0,000499	0,341461854	0,370833	0,629167	0,717314
0,00035	0,000549	0,375653935	0,404758	0,595242	0,688882
0,0004	0,000599	0,409846016	0,437822	0,562178	0,66117
0,00045	0,000649	0,444038097	0,469973	0,530027	0,634224
0,0005	0,000699	0,478230177	0,501162	0,498838	0,608084
0,00055	0,000749	0,512422258	0,531348	0,468652	0,582784
0,0006	0,000799	0,546614339	0,560495	0,439505	0,558356
0,00065	0,000849	0,58080642	0,588573	0,411427	0,534824
0,0007	0,000899	0,614998501	0,615557	0,384443	0,512208
0,00075	0,000949	0,649190582	0,64143	0,35857	0,490523
0,0008	0,000999	0,683382662	0,66618	0,33382	0,469779
0,00085	0,001049	0,717574743	0,689801	0,310199	0,449983
0,0009	0,001099	0,751766824	0,71229	0,28771	0,431134
0,00095	0,001149	0,785958905	0,733653	0,266347	0,41323
0,001	0,001199	0,820150986	0,753898	0,246102	0,396262
0,00105	0,001249	0,854343067	0,773039	0,226961	0,38022
0,0011	0,001299	0,888535147	0,791094	0,208906	0,365088
0,00115	0,001349	0,922727228	0,808084	0,191916	0,350847
0,0012	0,001399	0,956919309	0,824036	0,175964	0,337478
0,00125	0,001449	0,991111139	0,838978	0,161022	0,324955
0,0013	0,001499	1,025303471	0,852941	0,147059	0,313252
0,00135	0,001549	1,059495552	0,865958	0,134042	0,302342
0,0014	0,001599	1,093687632	0,878066	0,121934	0,292195
0,00145	0,001649	1,127879713	0,889302	0,110698	0,282778
0,0015	0,001699	1,162071794	0,899703	0,100297	0,27406
0,00155	0,001749	1,196263875	0,909311	0,090689	0,266008
0,0016	0,001799	1,230455956	0,918163	0,081837	0,258589
0,00165	0,001849	1,264648037	0,926302	0,073698	0,251768
0,0017	0,001899	1,298840117	0,933766	0,066234	0,245512
0,00175	0,001949	1,333032198	0,940596	0,059404	0,239787
0,0018	0,001999	1,367224279	0,946831	0,053169	0,234562
0,00185	0,002049	1,40141636	0,95251	0,04749	0,229802
0,0019	0,002099	1,435608441	0,95767	0,04233	0,225478
0,00195	0,002149	1,469800521	0,962347	0,037653	0,221558
0,002	0,002199	1,503992602	0,966577	0,033423	0,218012
0,00205	0,002249	1,538184683	0,970394	0,029606	0,214813
0,0021	0,002299	1,572376764	0,97383	0,02617	0,211934
0,00215	0,002349	1,606568845	0,976915	0,023085	0,209348
0,0022	0,002399	1,640760926	0,97968	0,02032	0,20703