

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 3911T016 Materiálové inženýrství a strojírenská
metalurgie

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Kvalita polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6 pro cementovaná ozubená kola
ve větrné energetice

Autor: **Bc. Václav Hrdlička**

Vedoucí práce: **Doc. Dr. Ing. Antonín Kříž**

Akademický rok 2011/2012

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu diplomové práce Doc. Dr. Ing. Antonínu Křížovi a konzultantovi Ing. Jiřímu Hájkovi, Ph. D. za odbornou pomoc a vstřícný přístup při zpracovávání této diplomové práce.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Hrdlička	Jméno Václav	
STUDIJNÍ OBOR	Materiálové inženýrství a strojírenská metalurgie		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Doc. Dr. Ing. Kříž	Jméno Antonín	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KMM		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Kvalita polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6 pro cementovaná ozubená kola ve větrné energetice		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KMM	ROK ODEVZD.	2012
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN

CELKEM	78	TEXTOVÁ ČÁST	73	GRAFICKÁ ČÁST	5
---------------	----	---------------------	----	----------------------	---

STRUČNÝ POPIS	<p>Teoretická část diplomové práce se zabývá větrnou energetikou, druhy převodovek, materiály používanými pro ozubená kola, cementováním a nitrocementováním a napětími a deformacemi.</p> <p>Experimentální část je zaměřena na posouzení vlastností polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6 (mikročistota, řádkovitost, velikost austenitického zrna, mikrostruktura a tvrdost podle Vickerse) a posouzení vlivu chemicko-tepelného zpracování na výslednou strukturu.</p>
KLÍČOVÁ SLOVA	Cementování ozubených kol, kvalita polotovarů, mikročistota, řádkovitost, velikost austenitického zrna

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Hrdlička	Name Václav	
FIELD OF STUDY	Materials Engineering and Engineering Metallurgy		
SUPERVISOR	Surname Doc. Dr. Ing. Kříž	Name Antonín	
INSTITUTION	ZČU - FST - KMM		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Quality of semi-finished steel product 18CrNiMo7-6 of carburized gears for wind energetics		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KMM	SUBMITTED IN	2012
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES

TOTALLY	78	TEXT PART	73	GRAPHICAL PART	5
----------------	----	------------------	----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>The theoretical part of the thesis deals with wind energy, types of gears, materials used for gears, carburizing and carbonitriding, stresses and deformations.</p> <p>The experimental part focuses on assessment of the properties of semi-finished products from steel 18CrNiMo7-6 (microcleanness, banding, austenite grain size, microstructure and Vickers hardness) and assessment of the effect of heat treatment on the resulting structure.</p>
KEY WORDS	Carburizing of gears, quality of semi-finished steel products, microcleanness, banding, austenite grain size

Obsah

Úvod.....	1
1 Větrná energetika.....	2
1.1 Historie a vývoj větrné energetiky ve světě [1]	2
1.2 Historie a vývoj větrné energetiky v ČR [1]	3
1.3 Technologie větrných elektráren a jejich vývoj [1]	5
1.4 Výrobci větrných elektráren.....	5
2 Převodovky [7]	6
2.1 Rozdělení převodovek.....	7
2.1.1 Převodovky se stálým převodovým poměrem.....	7
2.1.2 Převodovky s plynule měnitelným převodem - variátory.....	10
2.2 Způsoby přenosu otáček mezi rotorem a generátorem větrných elektráren [4].....	10
2.3 Převodovky používané ve větrných elektrárnách [4].....	11
3 Materiály na ozubená kola.....	12
3.1 Požadavky na materiály ozubených kol.....	13
3.2 Druhy materiálů používaných na ozubená kola a jejich zpracování.....	13
3.2.1 Oceli vhodné k zušlechťování	14
3.2.2 Oceli vhodné k povrchovému kalení	14
3.2.3 Cementační oceli.....	15
3.2.4 Nitridační oceli	16
3.2.5 Oceli vhodné k nitrocementaci	17
4 Chemicko-tepelné zpracování ozubených kol.....	18
4.1 Cementování ozubených kol	18
4.1.1 Cementování v plynu	19
4.1.2 Cementování ve vakuu.....	27
4.1.3 Plazmové cementování	28
4.2 Cementování ozubených kol.....	31
5 Napětí a deformace.....	32
5.1 Rozdělení pnutí podle objemu	33
5.2 Rozdělení pnutí podle příčiny vzniku	34
5.3 Deformace	37
6 Experimentální posouzení dodaného stavu polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6	39

6.1	Výběr dodavatele a kontrola dodaného stavu polotovaru	39
6.2	Cíle experimentální části práce	39
6.3	Hodnocený materiál	40
6.4	Posuzované vlastnosti	42
6.4.1	Mikročistota	42
6.4.2	Velikost austenitického zrna	45
6.4.3	Řádkovitost	48
6.5	Výsledky hodnocení	49
6.5.1	Mikročistota	49
6.5.2	Velikost austenitického zrna	50
6.5.3	Řádkovitost a mikrostruktura	50
6.5.4	Tvrdost HV ₁₀	60
7	Vliv chemicko-tepelného zpracování na výslednou strukturu	60
8	Diskuse výsledků	64
8.1	Mikročistota	64
8.2	Velikost austenitického zrna	64
8.3	Řádkovitost	64
8.4	Mikrostruktura	65
8.5	Tvrdost HV ₁₀	66
8.6	Vliv chemicko-tepelného zpracování na výslednou strukturu	66
9	Návrh úpravy dodacích podmínek polotovarů	66
	Závěr	68
	Použité zdroje	69
	Seznam obrázků, tabulek a grafů	71
	Přílohy	74

Seznam symbolů a zkratk

VE	Větrná elektrárna
HRC	Tvrdost podle Rockwella
HV	Tvrdost podle Vickerse
FP	Fetiticko-perlitický stav
ME	Nejvyšší stupeň kvality materiálu a tepelného zpracování ozubených kol podle ČSN ISO 6336-5
A_3	Teplota austenitizace [K]
A_1	Eutektoidní teplota [K]
M_s	Teplota začátku martenzitické přeměny [K]
M_f	Teplota konce martenzitické přeměny [K]

Úvod

Větrná energetika je stále na vzestupu a hraje důležitou roli v celkové produkci elektrické energie. S rozvojem větrné energetiky souvisí technologický vývoj samotných větrných elektráren. Ty musí splňovat stále vyšší požadavky nejen na jejich kvalitu, ale také na výkon, se kterým se zvyšují nároky na jejich konstrukci. Stožáry elektráren dnes dosahují běžně výšky přes 100 metrů a průměr rotorů se pohybuje od 50 do 140 metrů. Pro přenos značných výkonů, které se běžně pohybují okolo 2 MW (výjimečně až 6 MW) se proto ve větrných elektrárnách používají planetové převodovky. Protože se jedná o značně namáhanou součást elektrárny a její výroba s sebou nese vysoké náklady, je nutné, aby dosahovala co možná nejvyšší kvality. Kromě konstrukčního řešení, technologie výroby a zpracování hraje významnou roli v celkové kvalitě zařízení také jakost materiálu, z kterého jsou vyrobeny jeho jednotlivé součásti.

Ozubená kola převodovky procházejí během výroby řadou technologických operací, které postupně zvyšují jejich hodnotu. Jednou z posledních technologických operací je chemicko-tepelné zpracování (cementace). Obecně se dá říci, že vady nebo nevhodné zpracování během výroby se obvykle projeví až při tepelném nebo chemicko-tepelném zpracování, kdy je hodnota součástí nejvyšší. Protože cena ozubeného kola na konci celého výrobního procesu značně převyšuje pořizovací cenu materiálu, měl by být v první řadě kladen důraz na jeho kvalitu.

Na mechanické vlastnosti oceli pro cementovaná ozubená kola používaná v převodovkách jsou kladeny vysoké požadavky. Povrch zubu musí dosahovat vysoké tvrdosti při zachování houževnatosti a vysoké pevnosti jádra. Z tohoto důvodu se v současnosti, pro vysoce namáhaná cementovaná ozubená kola, používají středně legované ušlechtilé oceli, jakou je i často používaná chrom-nikl-molybdenová ocel 18CrNiMo7-6.

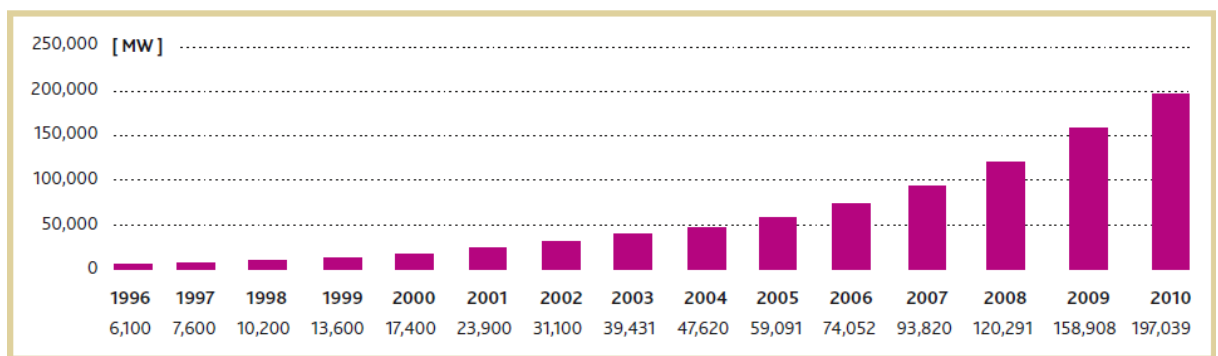
Teoretická část práce se zabývá větrnou energetikou, převodovkami, materiály používanými na ozubená kola, chemicko-tepelným zpracováním a napětím a deformacemi při tepelném a chemicko-tepelném zpracování. Hlavním cílem této diplomové práce je posoudit kvalitu polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6, používané pro cementovaná ozubená kola ve větrné energetice. Kvalita polotovarů bude hodnocena na základě předem zvolených vlastností, které budou stanoveny vnitropodnikovou normou firmy, která pro tuto práci poskytla materiál a řešiteli projektu, jehož součástí je i tato práce. Hodnocení polotovarů se bude provádět v souladu s platnými normami. Výsledkem experimentu bude posouzení, zda jsou polotovary dodávané v požadovaném stavu a kvalitě. Dalším cílem práce je posoudit vliv cementování na výslednou strukturu polotovarů. Po provedení experimentu bude výsledná struktura vzorků porovnávána se strukturou vzorků v původním dodávaném stavu. Výsledkem tohoto experimentu bude zjištění, zda je možné cementováním případnou nekvalitu polotovarů snížit nebo úplně odstranit.

Vypracování této práce umožní určit, zda jsou polotovary z oceli 18CrNiMo7-6 dodávány ve vyhovující či nevyhovující kvalitě. Na základě této práce budou navrženy možné úpravy dodacích podmínek polotovarů.

1 Větrná energetika

V současnosti hraje větrná energetika významnou roli v celkové produkci elektrické energie. Toto odvětví, dříve považované za okrajové a málo perspektivní, se postupně stává jedním z hlavních trendů světové energetiky. Z grafu 1 je patrný trend zvyšování celosvětového instalovaného výkonu větrných elektráren (dále jen VE). Větrná energetika využívá nevyčerpatelného zdroje v podobě větru, zároveň je maximálně šetrná k životnímu prostředí, což je v dnešní době důležité především z hlediska produkce skleníkových plynů. Důležitým faktem je také to, že v porovnání s jadernými nebo uhelnými elektrárnami mají větrné elektrárny podstatně rychlejší energetickou návratnost (doba, za kterou elektrárna vyrobí tolik energie, kolik bylo spotřebováno na její výrobu). U VE je to v rozmezí 6 až 12 měsíců při životnosti 20 let. Nespornou výhodou je také skutečnost, že výstavba VE trvá okolo jednoho měsíce, demontáž 2 až 3 dny. Během tak krátké doby stavba nezanechává v terénu téměř žádné následky a zemědělské plochy lze dále využívat téměř v původním rozsahu.

Využívání energie větru s sebou také samozřejmě přináší i jisté nevýhody, jimiž jsou například hluchost VE nebo rušení elektromagnetického pole. Hlavní nevýhodou VE je nestálost dodávek energie, závislých na povětrnostních podmínkách. [1]



Graf 1 Růst celosvětového instalovaného výkonu větrných elektráren (1996 – 2010) [2]

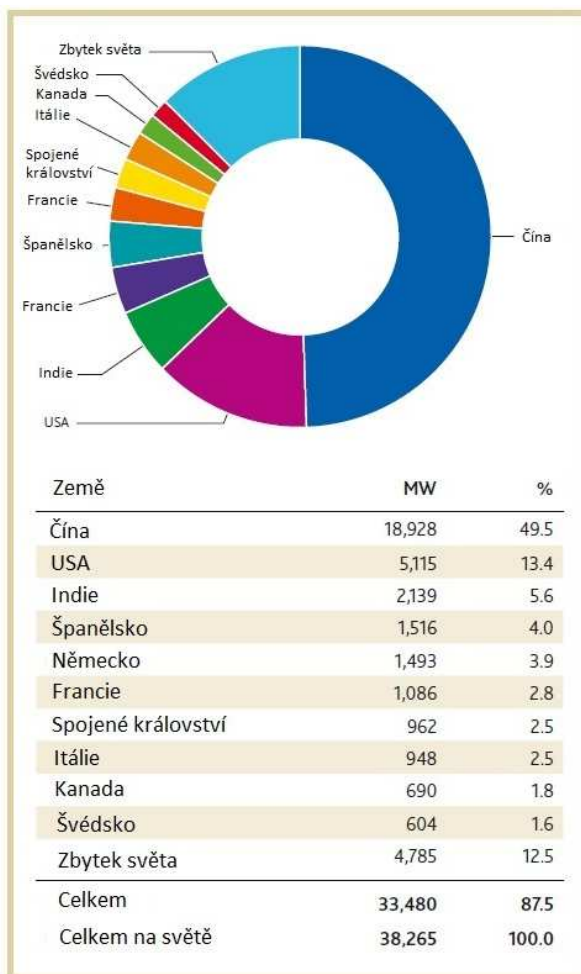
1.1 Historie a vývoj větrné energetiky ve světě [1]

Přestože lze snahy o využití energie větru k výrobě elektřiny datovat již od počátků elektroenergetiky, za období systematictějšího vývoje větrné energetiky lze považovat teprve druhou polovinu 70. let. Prvním silnějším impulzem byla značná podpora větrné energie v Kalifornii v 80. letech. I když byla technologie v této době ještě na začátku svého vývoje a ne všechny pokusy končily úspěšně, lze tento „boom“ považovat za důležitý z hlediska prověření různých technologických konceptů.

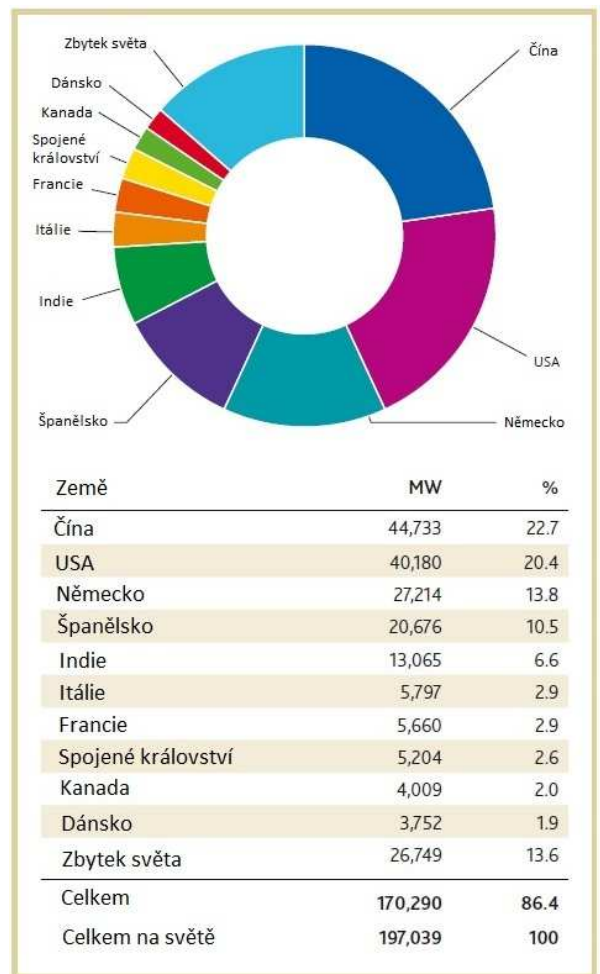
Další období větrné energetiky je typické pomalým, ale již organizovanějším vývojem především za podpory Dánska (díky této podpoře dnes Dánsko patří k technologickým vůdcům v tomto oboru). V této době se již technologický princip příliš nemění, důraz je kladen spíše na zvyšování spolehlivosti, účinnosti a také velikosti VE. Tím dochází ke snižování nákladů na jednotku vyrobené energie a umožňuje výstavbu elektráren i mimo upřednostňované lokality na mořských pobřežích. Této příležitosti kromě Dánska využívá Německo a přibližně v polovině 90. let zde dochází k značnému rozvoji výstavby VE, který vrcholí v prvních letech 21. století.

Zatímco první vlna výstavby VE se týkala poměrně úzkého okruhu států v čele s Dánskem a Německem (od roku 2000 také Španělskem), od roku 2005 dochází k celosvětovému rozvoji větrné energetiky. V posledních letech začala být energie větru systematicky podporována v USA a Číně a současně v evropských (Francie, Velká Británie, Portugalsko, Itálie aj.) i mimoevropských zemích (Indie, Kanada, Japonsko aj.).

V současnosti USA a Čína vedou v řebříčku nově instalovaného výkonu. V roce 2010 dokonce téměř polovinu podílu celosvětového nově instalovaného výkonu tvořila Čína (graf 2). Podíl jednotlivých zemí na celkovém výkonu VE v roce 2010 je uveden na grafu 3. Celosvětový instalovaný výkon VE v roce 2010 byl 197 GW, z čehož 38 GW přibýlo za poslední rok (pro srovnání: celková instalovaná kapacita všech elektráren v ČR je cca 20 GW). [2][3]



Graf 2 Podíl jednotlivých zemí na přírůstku instalovaného výkonu v roce 2010 [2]



Graf 3 Podíl jednotlivých zemí na celkovém výkonu větrných elektráren v roce 2010 [2]

1.2 Historie a vývoj větrné energetiky v ČR [1]

První historický záznam o postavení větrného mlýnu na území České republiky (v zahradě Strahovského kláštera v Praze) se váže k roku 1277. Největší rozkvět větrného mlynářství v Čechách byl v prvních dvou třetinách 19. Století, kdy se uvádí 198 doložených lokalit s větrnými mlýny. Na Moravě a ve Slezsku k největšímu rozkvětu došlo v poslední

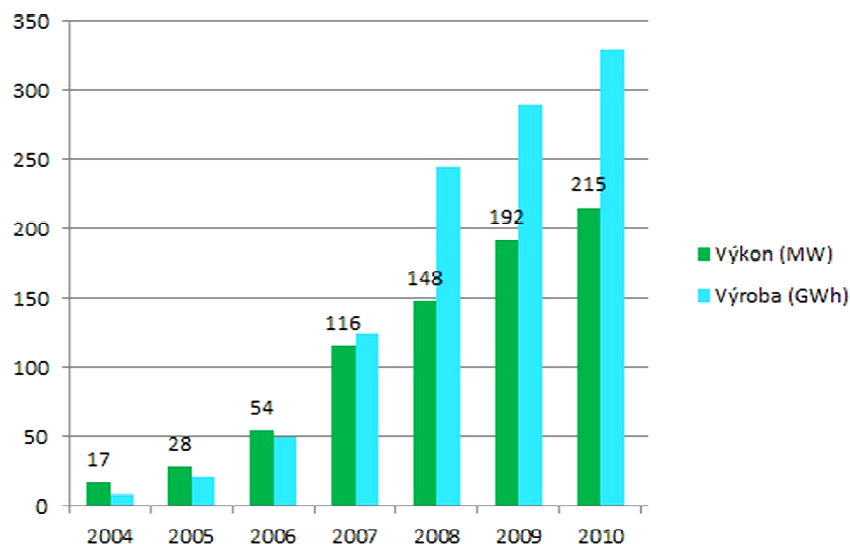
třetině 19. století a na začátku 20. Století. V této době bylo na území celé ČR 879 větrných mlýnů.

Přestože historický vývoj naznačoval, že by Česká republika mohla patřit k progresivním státům ve využívání větrné energie, skutečnost se od těchto prognóz značně liší. Novodobý vývoj větrné energetiky lze rozdělit do dvou etap.

Za první etapu lze považovat období od roku 1990 do roku 1995. V této době bylo vybudováno 24 VE s celkovým instalovaným nominálním výkonem 8,22 MW. Příčin tohoto růstu bylo několik, a to především inspirace výstavbou VE v Dánsku a Německu díky otevření hranic, elektrárny vyráběné v ČR byly nabízeny o 30 % levněji než v zahraničí a obecný předpoklad, že výkupní ceny elektřiny z větru budou obdobné jako v zahraničí. I přes tyto slibně se jevící předpoklady rozvoj větrné energetiky zaznamenal v letech 1996-2002 pokles. Řada neprosperujících elektráren byla demontována. Důvodů tohoto poklesu bylo několik. Výkupní ceny elektřiny z VE do roku 2001 byly tak nízké, že neumožňovaly rentabilní provoz. VE domácích výrobců vykazovaly značnou poruchovost a neprošly fází provozních zkoušek. Dále pak skutečnost, že tento rozvíjející se obor neměl potřebné teoretické, odborné a legislativní zázemí (např. mnoho VE bylo postaveno na místech s nepříznivými větrnými podmínkami).

Za druhou etapu rozvoje větrné energetiky v ČR je možné považovat období od roku 2002, kdy byla stanovena minimální výkupní cena energie z větru, která umožňuje rentabilní provoz VE. Od té doby výstavba pozvolna narůstá. V současnosti se VE nacházejí především v oblasti Krušných hor, Dražanské vrchoviny a v Nížkém Jeseníku. Od roku 2007 již není přírůstek instalovaného výkonu tak výrazný z důvodu prodlužovacích dodacích lhůt VE, blokování kapacit pro vyvedení výkonu do elektrické sítě (i jiné projekty obnovitelných zdrojů energie; dnes především sluneční energie) a rostoucích obstrukcí ze strany některých orgánů veřejné správy.

V roce 2010 celkový instalovaný výkon VE v ČR dosahoval 215 MW (graf 4). Na výrobě elektrické energie v ČR se v roce 2010 vítr podílel 0,39 %. [4][5]



Graf 4 Vývoj instalovaného výkonu v ČR v letech 2004 -2010 [4]

1.3 Technologie větrných elektráren a jejich vývoj [4]

V závislosti na průměru rotoru se VE dělí na malé, střední a velké. K malým patří elektrárny s průměrem rotoru menším než 16 m a nominálním výkonem menším než 60 kW. Dále se tyto elektrárny dělí na tzv. mikrozdroje, které mají průměr rotoru od 0,5 do 3 m a výkon 2 až 2,5 kW (např. k napájení radiových a televizních přijímačů, ledniček a osvětlení) a zařízení s průměrem rotoru od 3 do 8 m s nominálním výkonem 2,5 až 10 kW sloužící např. k vytápění či temperování domů a ohřev vody. Střední VE mají průměr rotoru od 16 do 45 m a nominální výkon 60 až 750 kW. Velké mají rotor o průměru 45 do 140 m s nominálním výkonem 750 až 7000 kW.

Účinnost VE závisí především na rozměrech a typu rotoru. V současnosti se používají rotory se třemi listy, které jsou aerodynamicky a dynamicky vyvážené. V případě zvyšování rychlosti (zvyšování výkonu) by mohlo dojít k poškození generátoru. Z tohoto důvodu je nutné rychlost rotoru (optimálně 12 až 14 m/s) regulovat natáčením lopatek. V případě zvýšení rychlosti na vypínací rychlost (cca 25 m/s) jsou rotory pomocí kotoučových brzd uvedeny do klidové polohy.

Otáčky rotoru (10 až 20ot/min.) je nutné převést na mnohem větší rychlosti generátorů obvykle mezi 1000 a 3000ot/min. pomocí převodovek. Tradiční konstrukce VE se skládá z hnacího hřídele, ložisek, převodovek a spojek. Další možností je technologie bez převodovky, kdy se místo převodovky využívá nízkorychlostních multipólových generátorů. Tuto technologii vyvinula německá společnost Enercon na konci 90. let minulého století. Výhodou je především snížení rozměrů a hmotnosti celé VE, odpadají spojovací prvky a celková údržba je snadnější. Pokud jde o hlučnost, současné převodovky nepřesahují hlukové emise elektráren bez převodovek. V současnosti se používají obě technologie.

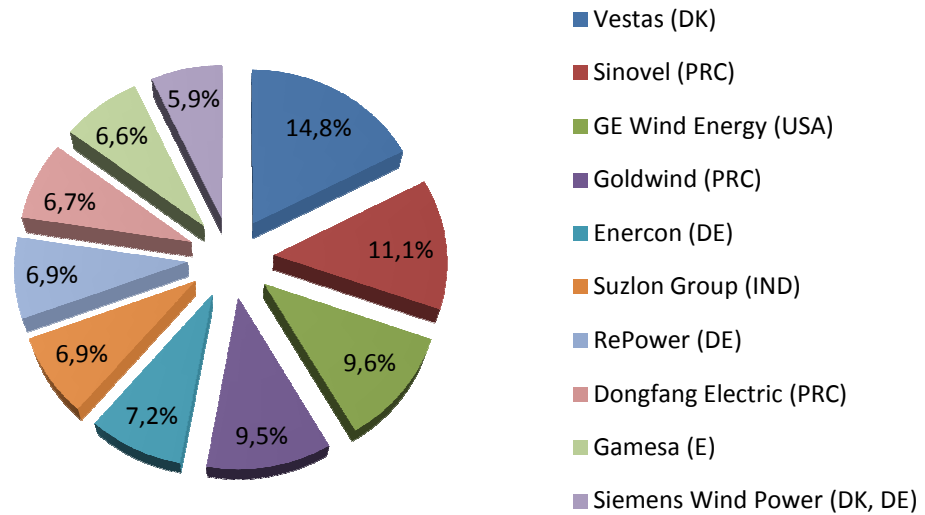
Značný vývoj zaznamenaly stožáry VE. Původně dosahovaly výšky okolo 20 m, dnes jsou běžné stožáry s výškou 100 až 120 m, i více. Nejpoužívanější konstrukce je dnes kónický ocelový tubus. U vyšších elektráren se mohou používat betonové, kombinované z oceli a betonu nebo stožáry s příhradovou konstrukcí.

Hlavními trendy vývoje VE v současnosti jsou: zvětšování výkonu spojeným se zvětšováním průměru rotorů, zvětšování výšky stožárů, snižování poruchovosti, hlučnosti a nároků na provoz a snižování nákladů na jednotku vyrobené energie.

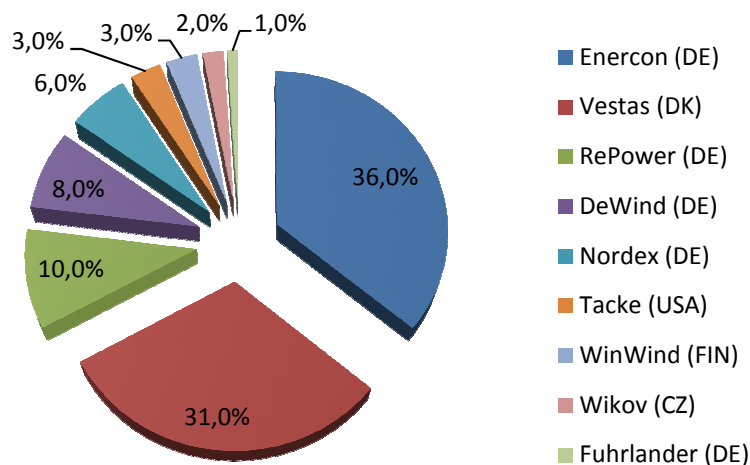
1.4 Výrobci větrných elektráren

Protože je větrná energetika ve světě i v ČR stále na vzestupu, dochází tím i ke stálému zvyšování produkce VE. Za posledních pět let (2006 – 2010) se celosvětový instalovaný výkon meziročně zvyšoval o 27 % na celkových 197 GW. V roce 2010 pracovalo ve větrné energetice asi 463 tisíc zaměstnanců a předpovědi ukazují na značný nárůst až na 1,4 milionu zaměstnanců do roku 2015. Tyto skutečnosti vedou ke zvyšování výrobních kapacit současných výrobců VE, ale také možnosti vstupu nových společností na trh. [2]

V současnosti existuje mnoho výrobců VE, avšak převážnou většinu instalovaného výkonu zajišťuje jen několik předních společností. Na grafech 4 a 5 jsou uvedeny názvy největších výrobců VE seřazené podle světového tržního podílu a podle instalovaného výkonu v ČR.



Graf 5 Deset největších výrobců větrných elektráren podle tržního podílu v roce 2009 [6]



Graf 6 Rozdělení výrobců větrných elektráren podle instalovaného výkonu v ČR k 10. 1. 2011 [4]

2 Převodovky [7]

Převodovky jsou jak jednoduchá, tak i složitější zařízení, která vznikají sériovým nebo paralelním řazením jednoduchých převodových prvků. Převodovka se vkládá mezi hnací člen (motor) a výstupní člen, který může mít různou funkci. Důležitou částí převodovek je i jejich rám, který může plnit i další funkce, např. vřeteník.

Úkolem převodovky je přenos rotačního pohybu mezi hřídelí hnacího (motor) a hnaného členu (pracovní stroj) se změnou úhlové rychlosti a točivého momentu. Podle toho, zda dochází ke snížení nebo zvýšení otáček na výstupní hřídeli se převodovky rozdělují na reduktory (snížení otáček, větší točivé momenty) a multiplikátory (zvýšení otáček, menší točivé momenty).

Základními funkčními parametry převodovek jsou:

- vstupní výkon, resp. kroutící moment [kW] ([Nm])
- otáčky na výstupu [ot/min]
- celkový převod
- celková účinnost
- životnost [hod]

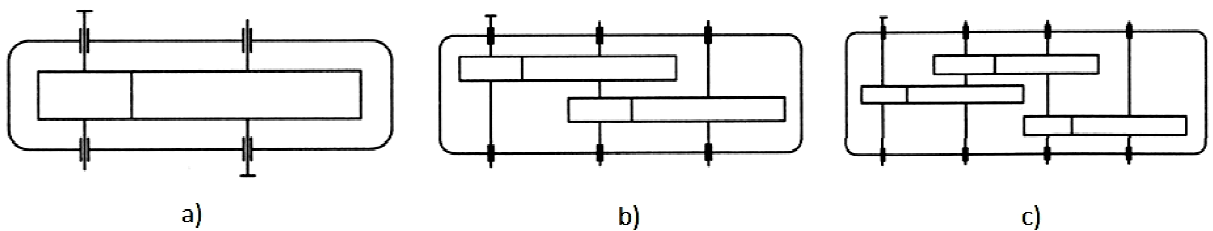
2.1 Rozdělení převodovek

Převodovky je možné dělit podle mnoha kritérií jako je konstrukční uspořádání, typ výstupního pohybu nebo počet výstupních rychlostí výstupního členu. Výběr převodovky vždy závisí na požadavcích dané aplikace. Níže budou stručně uvedeny druhy převodovek a jejich schémata, které se ve strojírenství nejčastěji používají.

2.1.1 Převodovky se stálým převodovým poměrem

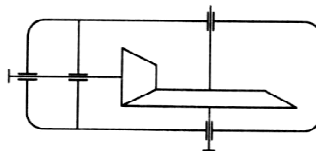
Převodovky se stálou polohou os a konvenčními ozubenými převody

a) Převodovky s čelními koly



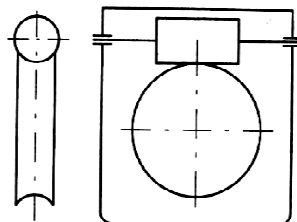
Obr. 1 Schéma převodovek s čelními koly s jedním a), se dvěma b) a se třemi převody c) [14]

b) Převodovky s kuželovým soukolím



Obr. 2 Schéma převodovky s kuželovým soukolím [14]

d) Šnekové převodovky



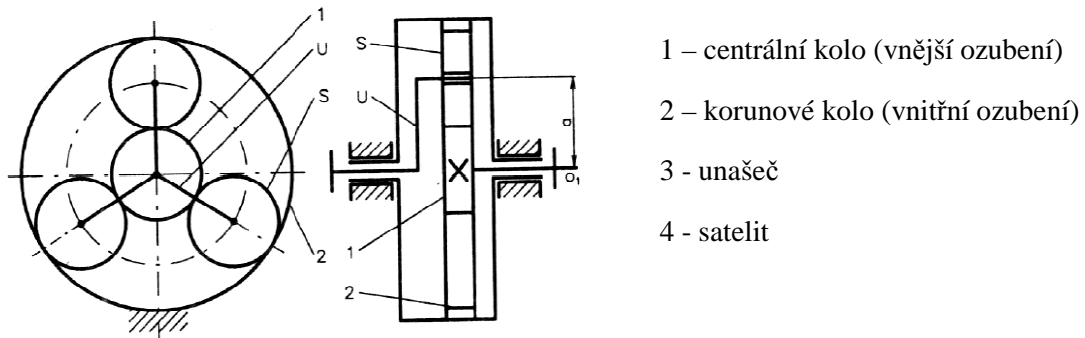
Obr. 3 Schéma šnekové převodovky [14]

Převodovky s proměnnou polohou os a konvenčními ozubenými převody

a) Planetové převody

Planetová soukolí jsou tvořena soustavou ozubených kol a unašečem. Takzvaná centrální a korunová kola jsou souosá s unašečem a centrální osou převodového mechanismu. Satelity jsou pak ozubená kola otočně uložená na unašeči a jsou v záběru s centrálními a korunovými koly. Satelity mohou mít jedno, dvě nebo více ozubení. [8]

Příklad jednoduchého planetového převodu s jednostupňovým ozubením je uveden na obrázku 4.

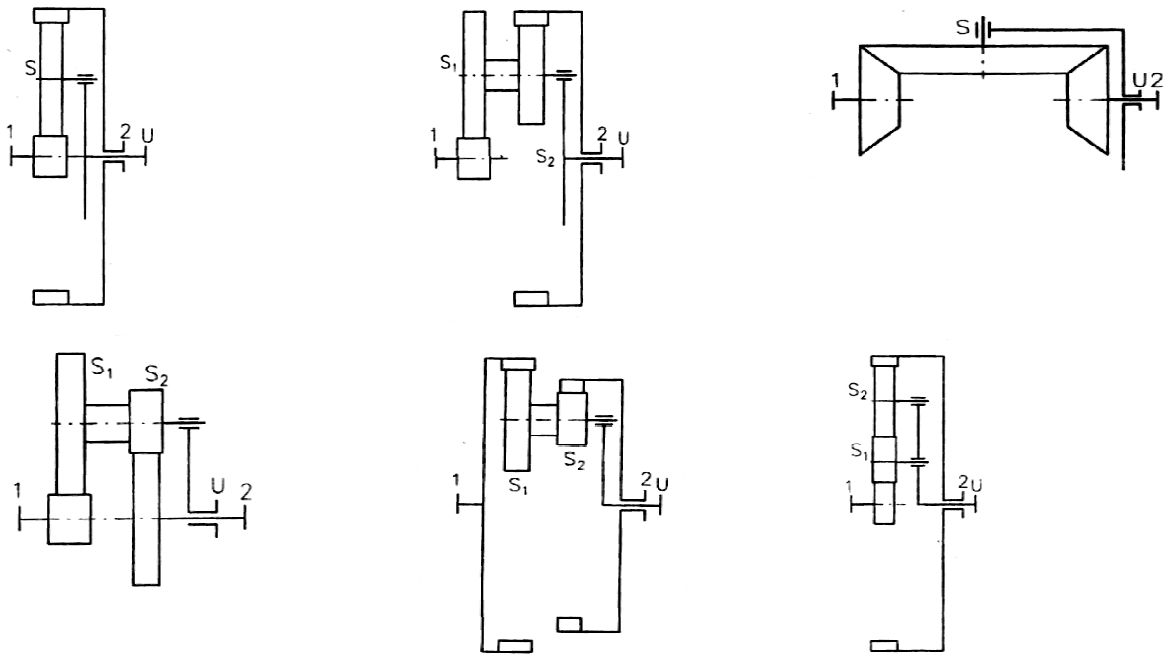


Obr. 4 Schéma jednoduchého planetového převodu [14]

Jestliže jsou u jednoduchého planetového převodu volné všechny tři základní členy (1, s, 2), jedná se o diferenciál (2 stupně volnosti), který umožňuje skládat nebo rozkládat pohyby do jednoho. Toho se využívá například u obráběcích strojů (skládání) nebo u automobilového diferenciálu (rozkládání pohybu).

Je-li spojen s rámem jeden ze základních členů (1 nebo 2) vzniká planetový převod (1 stupeň volnosti), a to reduktor při pohonu směrem od centrálního kola nebo multiplikátor při pohonu směrem od unašeče. Pokud je s rámem spojen unašeč jedná se o normální převodovku neboli porovnávací převod. [8]

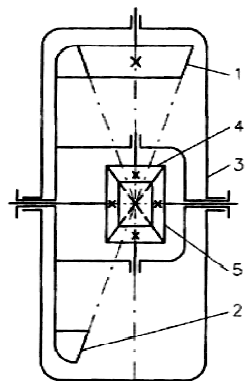
Planetové převody je možné vzájemně řadit nejrůznějšími způsoby. Nejčastějším způsob je řazení za sebou, kdy je celkový převodový poměr dán součinem dílčích převodových poměrů. U skládaných převodů je často používána možnost brzdění jednotlivých členů a tím řazení převodových stupňů. Počet satelitů se může lišit podle konkrétního použití od dvou do osmi (nejčastěji 3). [8]



Obr. 5 Schémata nejčastějších konstrukcí planetových převodovek [14]

b) Diferenciály

Velmi známý a používaný je diferenciál používaný v automobilech.

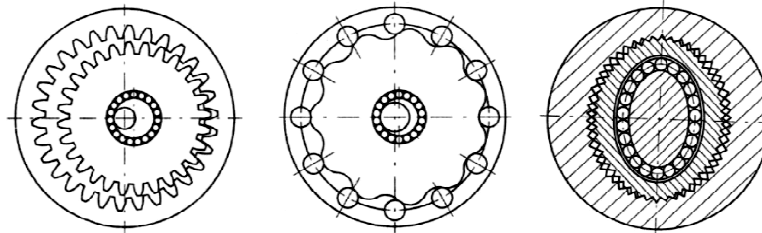


Obr. 6 Schéma automobilového diferenciálu [14]

Převodovky s proměnnou polohou os a s nekonvenčními převody

Excentrické převody s vysokým převodovým poměrem

Tyto převodovky používají speciální mechanické převody pro dosažení vysokých převodových poměrů. Obvykle mají v korunovém kole uložené ozubené kolo otočně na excentru poháněném hnacím hřídelem.

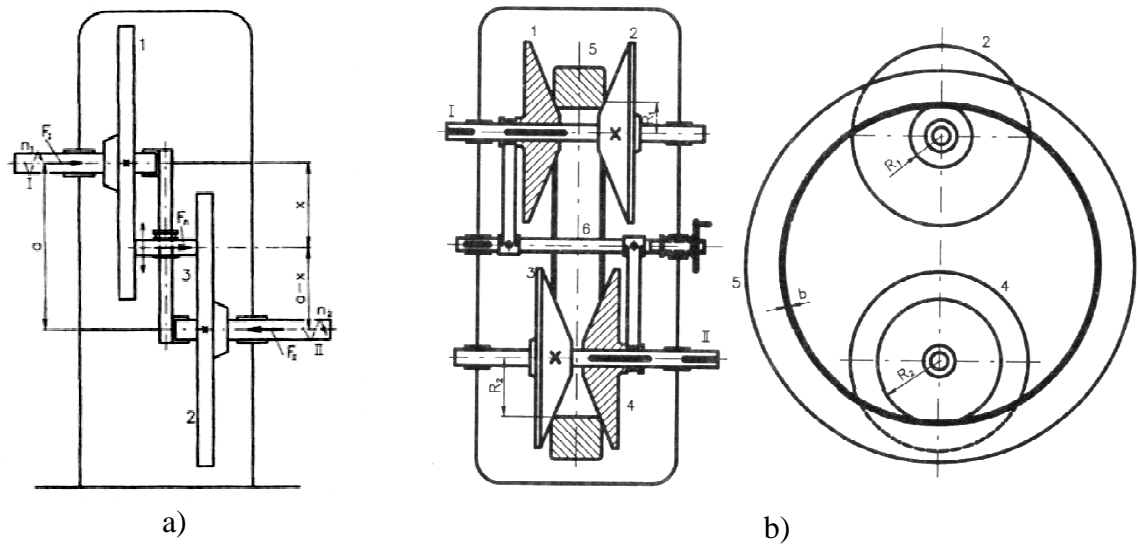


Obr. 7 Schémata excentrické planetové a), cykloidální b) a harmonické převodovky c) [14]

2.1.2 Převodovky s plynule měnitelným převodem – variátory

Variátory jsou třecí, řemenové nebo řetězové převody, které umožňují plynule měnit převod a tím plynule regulovat otáčky. Rovněž je možné měnit smysl otáčení (i za pohybu).

a) třecí variátory



Obr. 8 Schémata třecích variátorů: s převodovým mezičlenem a), s osově posuvnými kuželovými koly a kalenou ocelovou obručí (mezičlen) [14]

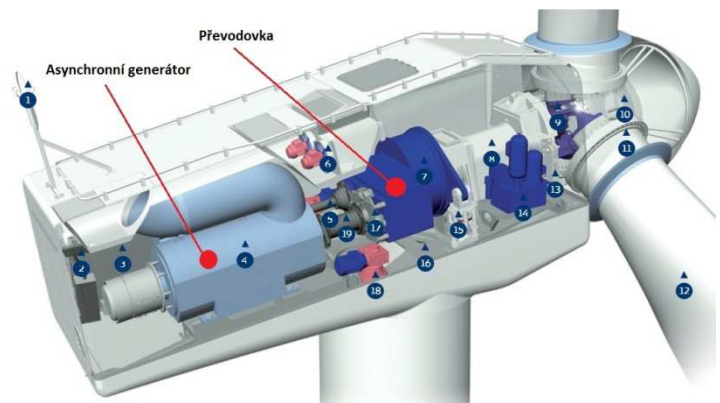
b) řemenové a řetězové variátory

Stejný princip pro dva páry posuvných kuželových kol, místo ocelové obruče je použit klínový řemen (řemenový variátor) nebo lamelový řetěz (kola musí mít radiálně drážkovaný povrch)

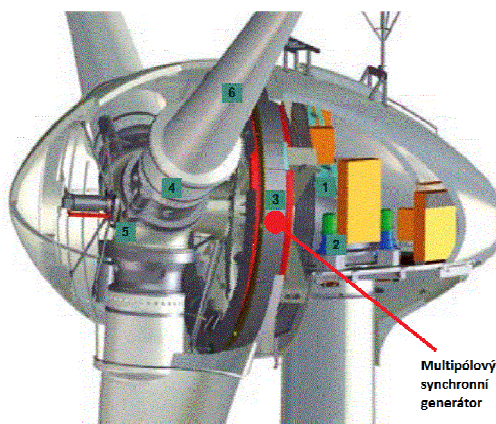
2.2 Způsoby přenosu otáček mezi rotorem a generátorem větrných elektráren [4]

V současnosti se pro transformaci energie větru na elektrickou energii nejčastěji používají dva způsoby konstrukčního uspořádání.

První technologie je založena na uspořádání strojovny s převodovkou a asynchronním generátorem (obr. 9). Výhodou tohoto systému je schopnost asynchronního generátoru pracovat v určitém rozmezí otáček, což vede ke snazší regulaci celého systému. Toto uspořádání používá největší výrobce větrných elektráren Vestas (DK).



Obr. 9 Strojovna s převodovkou a asynchronním generátorem [4]



Obr. 10 Strojovna s multipólovým synchronním generátorem [9]

Druhá méně používaná technologie využívá pouze multipólového synchronního generátoru bez převodovky (obr. 10). Na rotoru je umístěn jeden prstenec cívek (pólů), druhý je na statoru. Podle vyvozeného krouticího momentu rotoru se mění počet zapnutých pólových dvojic (čím větší krouticí moment, tím více zapnutých dvojic). Aby bylo takto vyrobenou elektrickou energií možné dodávat do sítě, musí se dále upravovat pomocí výkonové elektroniky, což vede k určitým ztrátám. Tuto technologii používá německá společnost Enercon.

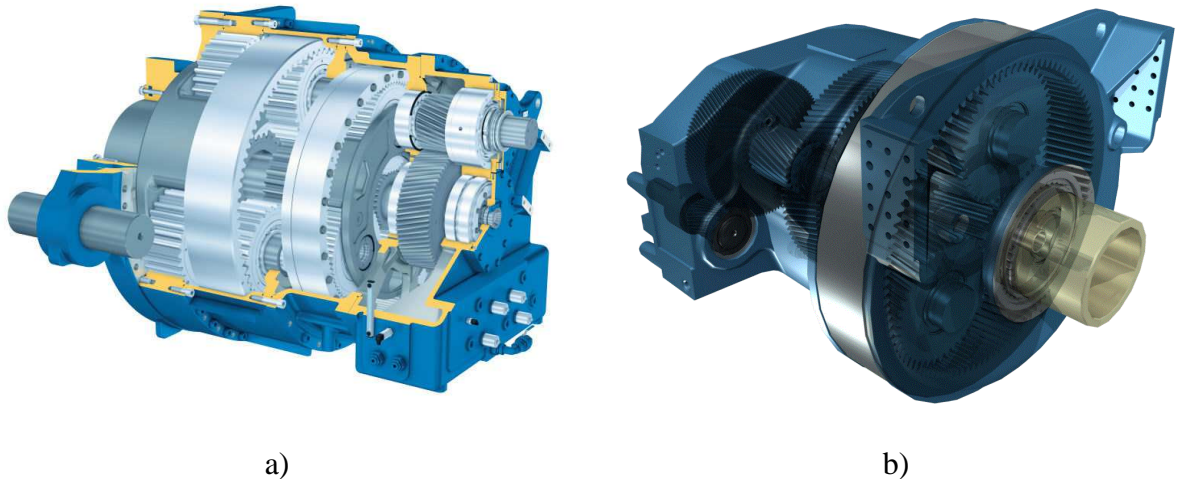
2.3 Převodovky používané ve větrných elektrárnách [4]

Převodové ústrojí (převodovka) větrné elektrárny slouží pro přenos nízkých otáček a vysokého krouticího momentu rotoru na vysoké otáčky s nízkým krouticím momentem generátoru. Převodová ústrojí se mohou podle typu větrných elektráren značně lišit. Vlivem kolísajícího zatížení (vlivem měnící se rychlosti větru) se však vždy jedná o velmi namáhanou součást. Při silných poryvech větru může zatížení dosahovat až několikanásobku běžných provozních hodnot. Převodovka také musí být schopna pracovat v širokém rozmezí teplot cca od -40°C do $+50^{\circ}\text{C}$. Aby mohly převodovky snášet tyto nepříznivé vlivy po celou dobu jejich životnosti (cca 20 let) musí být konstrukčně vyspělé, vyrobené z kvalitních materiálů, při dodržení vysoké výrobní kvality a v neposlední řadě řádně během provozu udržované. Tyto požadavky souvisí i s tichým chodem převodovek. Druhy převodových ústrojí je možné rozdělit podle přenášeného výkonu na dvě skupiny.

Převodovky pro výkony do 50 kW mívají obvykle čelní převod se šikmými zuby. Méně často se používají planetové převodovky z důvodu většího zahřívání, což by vzhledem k celkovému výkonu nebylo efektivní. U těchto převodovek bývají vstupní otáčky od rotoru 40 až 80ot/min. a převodový poměr 1:12 až 1:25 podle použitého generátoru.

Pro výkony nad 500 kW se nejčastěji používají planetové převodovky. Hlavními výhodami těchto převodovek jsou vysoké převodové poměry, možnost přenášet vysoká

zatížení a v porovnání s běžně uspořádanými převodovkami mají menší rozměry. Nejčastěji se používají několikastupňové nebo kombinované několikastupňové převodovky, u kterých jsou první stupně planetové a poslední jeden nebo dva stupně paralelní. Protože tyto převodovky přenášejí několikamegawattové zatížení, mají jednotlivé části značné rozměry. Korunové kolo může dosahovat průměru až 2500mm. Celá převodovka má pak hmotnost v řádu desítek tun. Na obrázku 11 jsou uvedeny příklady dvou typů planetových převodovek.



Obr. 11 Příklady převodovek pro větrné elektrárny: a) Dvoustupňová planetová převodovka s výstupním paralelním převodem od firmy Bosch – Rexroth pro výkon 2MW, b) Jednostupňová převodovka se dvěma paralelními převody od firmy GE Drivetrain Technologies pro výkon do 2,3 MW [4][10]

3 Materiály na ozubená kola

Při výběru materiálu pro ozubená kola je nezbytné zohlednit mnoho faktorů. Každý materiál má své výhody a nevýhody, které je nutné uvážit vzhledem k požadavkům konkrétní aplikace. Faktory ovlivňující výběr materiálu jsou následující: přenášená síla, obvodová rychlost, hmotnost, cena, životnost, vliv pracovního prostředí, hluchnost a bezpečnost. Ozubená kola se v současnosti vyrábí z širokého spektra materiálů. Nejčastěji jsou to oceli, litiny, lehké neželezné slitiny a plast.

Oceli na ozubená kola je možné rozdělit na oceli vhodné k zušlechťování, vhodné k povrchovému kalení, cementační, nitridační, vhodné k nitrocementaci, vhodné ke karbonitridaci a vysoce legované. Oceli se dále zpracovávají vhodným tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním, čímž se značně zlepšují jejich vlastnosti. Díky povrchovému zpracování (povrchové kalení, cementování, nitrocementování a nitridování) je možné dosáhnout houževnatého jádra a velice tvrdého povrchu zubů, což má zásadní vliv na životnost ozubeného kola. Vysoce legované oceli jsou vhodné pro aplikace, kde jsou ozubená kola vystavena agresivnímu prostředí nebo vysokým teplotám. V porovnání s ostatními materiály mohou ocelová ozubená kola přenášet největší zatížení

Z litin se na ozubená kola používá především litina šedá, méně často litina tvárná. Oproti oceli se používají na kola s menším zatížením a s menšími obvodovými rychlostmi (do 5m/s). Výhodou šedé litiny je schopnost tlumit rázy a chvění. Tvárná litina má díky kuličkovému grafitu dobré kluzné vlastnosti. Litiny mají s porovnáním s ocelí nižší měrnou hmotnost a jsou levnější.

Mezi lehké neželezné slitiny používané na ozubená kola patří bronzы, mosazi, hliníkové a titanové slitiny a slinuté materiály. Bronzы mají vynikající kluzné vlastnosti a používají se na ozubená kola přenášející větší zatížení. Spoluzabírající kolo je obvykle ocelové. Mosazi mají stejně jako bronzы výborné kluzné vlastnosti, dobré mechanické vlastnosti a jsou korozivzdorné. Hliníkové slitiny se používají pro středně namáhaná ozubená kola. Jejich výhodou je především nízká hmotnost. Slitiny titanu mají vysokou pevnost při nízké hmotnosti a jsou korozivzdorné. Slinuté materiály se používají na středně zatížená ozubená kola s "menší přesností", v některých případech i na kola silně zatížená.

Ozubená kola z plastů se používají v mnoha aplikacích, kde nedochází k přenosu velkého zatížení s vysokým počtem otáček. Výhody plastů jsou následující: nízká hmotnost, nízká hlučnost, schopnost tlumení vibrací a rázů, dobré kluzné vlastnosti, výborná chemická a korozní odolnost a elektroizolační vlastnosti. Nejčastěji se dnes používají polyamidy, polyoxymethyleny, polyetylentereftalát, polybutyilentereftalát, polyetereterketon, a polyeterimid. Pro zlepšení kluzných vlastností se tyto plasty mohou modifikovat sulfidem molybdeničitým nebo polytetrafluorethylenem.

Vzhledem k tématu této diplomové práce se budou následující kapitoly zabývat pouze ocelovými ozubenými koly.

3.1 Požadavky na materiály ozubených kol

Výběr konkrétního materiálu pro ozubená kola je jedním z klíčových úkonů v celém procesu výroby těchto značně namáhaných součástí. Požadavky na oceli pro ozubená kola jsou přímo závislé na požadovaných vlastnostech ozubených kol. Aby bylo možné vyrobit ozubené kolo, které bude splňovat všechny požadované vlastnosti, je nutné vybraný materiál dále zpracovávat tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním. Tím je možné zlepšit mechanické vlastnosti materiálu v celém průřezu nebo na jeho povrchu. Jednotlivé způsoby tepelného a především chemicko-tepelného zpracování budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Oceli ozubených kol by měly splňovat následující kritéria [11]:

- možnost zpracování (např. kalitelnost, obrobitelnost, aj.)
- možnost tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování (objemové kalení, cementování, nitrocementování, nitridování, karbonitridování a povrchové kalení)
 - odolnost proti nízkocyklové ($\leq 10^5$ cyklů) nebo vysokocyklové ($\geq 10^5$ cyklů) únavě při ohybu
 - odolnost proti pittingu (odlupování částecek materiálu a vznik mělkých důlků vlivem cyklického kontaktního zatížení na bocích zubů)
 - vysoká odolnost proti otěru
 - zachování pevnosti za vyšších teplot
 - vysoká pevnost v ohybu
 - vysoká vrubová a lomová houževnatost

3.2 Druhy materiálů používaných na ozubená kola a jejich zpracování

Oceli pro ozubená kola je možné rozdělit podle jejich vhodnosti k danému tepelnému nebo chemicko-tepelnému zpracování.

3.2.1 Oceli vhodné k zušlechťování

Tyto oceli mají obsah uhlíku od 0,3 do 0,6 % a poměrně nízký obsah legujících prvků (do 3 %). S rostoucím obsahem legujících prvků roste i jejich prokalitelnost. Ta je pro objemově kalená ozubená kola velice důležitá, protože se zvyšující se tvrdostí zakalené vrstvy ozubení roste i její pevnost. Naproti tomu vysoká prokalitelnost souvisí se snížením houževnatosti, což má na ozubení negativní vliv. Tyto oceli je možné dělit podle prokalitelnosti, nebo podle chemického složení na oceli nelegované jakostní a oceli ušlechtilé. Příklady ocelí vhodných k zušlechťování rozdělených podle chemického složení jsou uvedeny v tabulce 1. [12][13][14]

Druh oceli	Materiál	Obsah prvků [% hmot.]							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Nelegovaná jakostní	C45	0,42	max. 0,40	0,50	max. 0,03	max. 0,035	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,4
		-		-					
		0,50		0,80					
Ušlechtilá	34CrNiMo6	0,30	max. 0,40	0,50	max. 0,025	max. 0,035	1,30	0,15	1,30
		-		-			-		
		0,38		0,80			1,70	0,30	1,70
Ušlechtilá	42CrMo4	0,38	max. 0,40	0,60	max. 0,025	max. 0,035	0,90	0,15	-
		-		-			-		
		0,45		0,90			1,20	0,30	-

Tab. 1 Oceli pro zušlechťování [14]

3.2.2 Oceli vhodné k povrchovému kalení

Pro povrchové kalení jsou vhodné uhlíkové oceli s obsahem uhlíku 0,35 až 0,50 %. Při vyšších požadavcích na pevnost a houževnatost lze povrchově kalit středně legované konstrukční oceli. Nad 0,5 % uhlíku jsou oceli náchylné k praskání. Toto riziko roste se zvyšujícím se množstvím legujících prvků. V tabulce 2 jsou uvedené příklady ocelí vhodných k povrchovému kalení.[12]

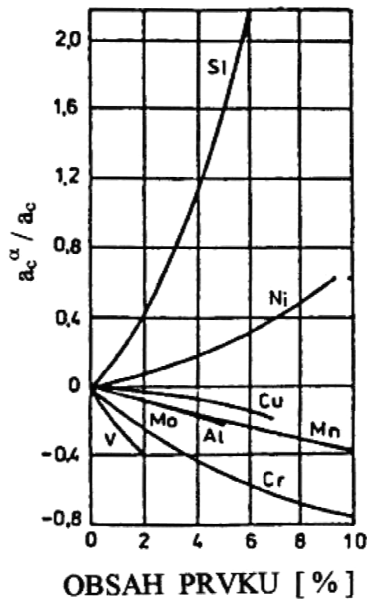
Materiál	Obsah prvků [% hmot.]							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
C40	0,37	max. 0,40	0,50	max. 0,03	max. 0,035	max. 0,40	max. 0,10	max. 0,40
	-		-					
	0,44		0,80					
42CrMo4	0,38	max. 0,40	0,60	max. 0,025	max. 0,035	0,90	0,15	-
	-		-			-		
	0,45		0,90			1,20	0,30	-
36CrNiMo4	0,32	max. 0,40	0,50	max. 0,035	max. 0,035	0,90	0,15	0,90
	-		-			-		
	0,40		0,80			1,20	0,30	1,20
46Cr2	0,42	max. 0,40	0,50	max. 0,025	max. 0,035	0,40	-	-
	-		-			-		
	0,50		0,80			0,60	-	-

Tab. 2 Oceli pro povrchové kalení [12]

3.2.3 Cementační oceli

Oceli vhodné k cementování mají nízký obsah uhlíku cca do 0,25 %. Obsah legujících prvků se podle typu oceli může značně lišit. Výběr materiálu určuje, jaká bude výsledná tvrdost povrchu zubů a jádra po cementaci a následném kalení. Tvrdost povrchu je přímo úměrná množství uhlíku v nauhličené vrstvě, avšak tvrdost jádra souvisí s jeho prokalitelností, která je závislá na legujících prvcích. Obvykle se tvrdost povrchu po cementování a kalení pohybuje okolo 60 HRC a tvrdost jádra mezi 32 a 48 HRC. [12][14]

Vliv legujících prvků na cementační oceli:



Obr. 12 Vliv legujících prvků v oceli na změnu aktivity uhlíku v austenitu [2]

Přísada niklu potlačuje vznik silně nadeutektoidní vrstvy na povrchu součásti a také zhrubnutí zrna za vyšších teplot. Oceli s obsahem niklu mají nižší kalící teplotu, proto po kalení dochází i k menším deformacím. Protože nikl zvyšuje aktivitu uhlíku (obr. 12) dochází při cementaci ke snížení jeho obsahu v povrchové vrstvě, avšak difúzní rychlost se zvyšuje. [13][15]

Přísada chromu má značný vliv na prokalitelnost oceli a tím na pevnost jádra. Nevýhodou ocelí s přísadou chromu je však náchylnost k vytváření silně nadeutektoidní povrchové vrstvy. Chrom zpomaluje difúzní rychlost uhlíku v oceli v důsledku snižování jeho aktivity (obr. 12). [13][15]

Výhodou ocelí s obsahem chromu a niklu může být jejich nízká teplota martenzitické přeměny. [15]

Přísadou molybdenu v cementačních ocelích se ještě více zlepšují jejich mechanické vlastnosti jádra. Oceli na bázi Cr-Ni-Mo jsou proto vhodné převážně pro rozměrnější ozubená kola. Molybden podobně jako chrom snižuje aktivitu uhlíku. [13][15]

Přísadou titanu je možné dosáhnout vyšších cementačních teplot a z těchto teplot přímo kalit. Titan vytváří s uhlíkem stabilní karbid, který se v austenitu rozpouští až při vysokých teplotách, což má za následek brzdění růstu zrna. Protože se určité množství uhlíku váže na karbid, mají tyto oceli vyšší obsah uhlíku. [16]

Cementační oceli je možné rozdělit podle chemického složení na oceli: nelegované (uhlíkové) se středním obsahem uhlíku od 0,10 do 0,20 %; oceli chromové, chrom-manganové, chrom-molybdenové a oceli chrom-niklové; oceli chrom-nikl-molybdenové. Dále lze oceli rozdělit podle rozdílu prokalitelnosti cementované vrstvy a základního materiálu. Příklady cementačních ocelí rozdělených podle chemického složení jsou uvedeny v tabulce 3. [14]

Druh oceli	Materiál	Obsah prvků [% hmot.]							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
Uhlíková	C16	0,13 - 0,20	0,15 - 0,40	0,60 - 0,90	max. - 0,040	max. - 0,040	max. - 0,25	-	max. - 0,30
Chromová	17Cr3	0,14 - 0,20	max. - 0,40	0,60 - 0,90	max. - 0,025	max. - 0,035	0,70 - 1,00	-	-
Chrom- manganová	16MnCr5	0,14 - 0,19	max. - 0,40	1,00 - 1,30	max. - 0,035	max. - 0,035	0,80 - 1,10	-	-
Chrom- molybdenová	20MoCr3	0,17 - 0,23	max. - 0,40	0,60 - 0,90	max. - 0,025	max. - 0,035	0,40 - 0,70	0,30 - 0,40	-
Chrom-niklová	17CrNi6-6	0,14 - 0,20	max. - 0,40	0,50 - 0,90	max. - 0,035	max. - 0,035	1,40 - 1,70	-	1,40 - 1,70
Chrom-nikl- molybdenová	18CrNiMo7-6	0,15 - 0,21	max. - 0,40	0,50 - 0,90	max. - 0,035	max. - 0,035	1,50 - 1,80	0,25 - 0,35	1,40 - 1,70

Tab. 3 Oceli pro cementování [14]

3.2.4 Nitridační oceli

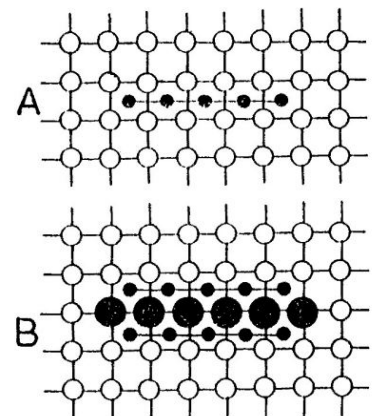
Oceli ozubených kol vhodné k nitridaci mají okolo 0,3 až 0,4 % uhlíku. Se zvyšujícím se množstvím legujících (nitridotvorných) prvků roste i tvrdost nitridované vrstvy (obr. 13). Naproti tomu legující prvky snižují difuzivitu dusíku, což vede k delším nitridačním časům. Legující prvky nitridačních ocelí jsou hliník, chrom, vanad, wolfram a molybden. Výchozím stavem ocelí pro nitridování je obvykle zušlechťení. [12][14][17]

Vliv legujících prvků na nitridační oceli [17]:

Hliník vytváří na povrchu součásti velmi tvrdé nitridy. Maximální množství hliníku v oceli nesmí přesahovat 1,5 %. Obsah hliníku již nad 1 % by při extrémním zatížení mohl způsobit popraskání nitridovaného povrchu, vlivem značného rozdílu tvrdosti mezi jádrem a povrchem.

Přísada chromu způsobuje vytváření stabilních nitridů, avšak při vysokém obsahu může u některých korozivzdorných ocelí nitridaci komplikovat vytvářením oxidu chromu na povrchu součásti. Vrstvu oxidu je proto před samotným nitridováním náležitě odstranit. Se vzrůstajícím množstvím chromu je z tohoto důvodu nitridování komplikovanější, avšak tvrdost povrchové vrstvy značně roste.

Vanad také vytváří stabilní nitridy v povrchové vrstvě součásti.



Obr. 13 Schéma Guinier-Prestonových zón v nitridované vrstvě (A – uhlíková ocel, B – slitinová ocel) [13]

Wolfram značně přispívá k udržení tvrdosti oceli i při vysokých teplotách. Podle množství wolframu a složení oceli je nitridovaná ocel schopná pracovat při teplotách do 590°C bez snížení tvrdosti povrchu a odolnosti proti otěru.

Molybden vytváří během nitridace stabilní nitridy, tím snižuje riziko zkřehnutí povrchu.

Podle chemického složení je možné nitridační oceli dělit na chrom-molybdenové, chrom-molybdenové legované hliníkem nebo vanadem a na oceli chrom-nikl-molybdenové nebo chrom-nikl-molybdenové legované hliníkem. Další rozdělení je možné podle pevnosti oceli v zušlechtném stavu v závislosti na směrdatném průřezu. Příklady nitridačních ocelí rozdělených podle chemického složení jsou uvedeny v tabulce 4. [14]

Druh oceli	Materiál	Obsah prvků [% hmot.]							
		C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	Al	V
Chrom-molybdenová	31CrMo12	0,28	max. 0,40	0,40	2,80	0,30	-	-	-
		-		-	-				
		0,35		0,70	3,30	0,50			
Chrom-molybdenová, legovaná hliníkem	32CrAlMo7-10	0,28	max. 0,40	0,40	1,50	0,20	-	0,80	-
		-		-	-	-			
		0,35		0,70	1,80	0,40		1,20	
Chrom-molybdenová, legovaná vanadem	31CrMoV9	0,27	max. 0,40	0,40	2,30	0,15	-	-	0,10
		-		-	-	-			
		0,34		0,70	2,70	0,25			0,20
Chrom-niklová, legovaná hliníkem	34CrAlNi7-10	0,30	max. 0,40	0,40	1,50	0,15	-	0,80	-
		-		-	-	0,85	-		
		0,37		0,70	1,80	0,25	1,15	1,20	

P max. 0,025 %, S max. 0,035 %

Tab. 4 Oceli pro nitridování [14]

3.2.5 Oceli vhodné k nitrocementaci

Všechny oceli vhodné pro cementování jsou vhodné i pro nitrocementování. Oceli používané pro nitrocementování mají obvykle do 0,25 % uhlíku, avšak pro vysoce namáhané součásti, jako jsou například ozubená kola, se používají oceli s obsahem uhlíku 0,3 až 0,5 %. Nitrocementace se také používá pro vysoce pevné oceli vyráběné práškovou metodou. Výhodou nitrocementace je její použitelnost i pro ocele s nižším obsahem legujících prvků, protože přísada dusíku (v porovnání s cementací) značně zvyšuje tvrdost nitrocementované povrchové vrstvy. Příklady ocelí používaných pro nitrocementování a vhodných pro ozubená kola jsou uvedeny v tabulce 5. [11][12]

Materiál	Obsah prvků [%]							
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
42CrMo4	0,38	max.	0,60	max.	max.	0,90	0,15	-
	-	0,40	-	0,025	0,035	-	-	-
	0,45		0,90			1,20	0,30	
28Cr4	0,24	max.	0,60	max.	max.	0,90	-	-
	-	0,40	-	0,025	0,035	-	-	-
	0,31		0,90			1,20		
40NiCrMo2	0,38	0,15	0,75	max.	max.	0,40	0,15	0,40
	-	-	-	0,035	0,04	-	-	-
	0,43	0,30	1,00			0,60	0,25	0,70
36CrNiMo4	0,32	max.	0,50	max.	max.	0,90	0,15	0,90
	-	0,40	-	0,035	0,035	-	-	-
	0,40		0,80			1,20	0,30	1,20

Tab. 5 Oceli pro nitrocementování [14]

4 Chemicko-tepelné zpracování ozubených kol

Chemicko-tepelné zpracování je tepelné zpracování doprovázené změnou chemického složení zpracovávaného materiálu, při kterém dochází k požadované změně jeho struktury a vlastností. V případě ozubených kol se převážně jedná o sycení povrchu uhlíkem nebo dusíkem.

Hlavním cílem chemicko-tepelného zpracování ozubených kol je zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení a zvýšení odolnosti proti cyklickému namáhání při zachování houževnatosti jádra. Dosažení požadovaných vlastností je možné nasycením povrchové vrstvy příslušným prvkem za zvýšených teplot a pomalým ochlazováním (např. nitridace), nebo nasycením povrchové vrstvy za zvýšených teplot a následným kalením (cementování a nitrocementování). [17]

V následujících kapitolách budou podrobněji popsány způsoby cementování a nitrocementování ozubených kol.

4.1 Cementování ozubených kol

Cementování je proces chemicko-tepelného zpracování, při kterém je ocel v austenitickém stavu vystavena prostředí s vysokým uhlíkovým potenciálem. Působením tohoto prostředí dochází k adsorpci uhlíku na povrch a dále k difúzi do materiálu vlivem koncentračního gradientu mezi povrchem a jádrem. Hloubka nauhličené vrstvy je závislá na teplotě, výdrž na této teplotě a na složení nauhličujícího prostředí. [12]

Jak již bylo napsáno, hlavním cílem cementování a následného kalení je dosažení tvrdého povrchu při vysoké pevnosti a houževnatosti jádra. To je dosaženo vysokým obsahem uhlíku v povrchové vrstvě po cementaci a současně nízkým obsahem uhlíku v jádře. Rychlým ochlazením se pak nauhličená povrchová vrstva zakalí na požadovanou tvrdost.

Způsoby cementace se podle druhu cementačního média rozdělují na cementování v prášku, v kapalném prostředí a v plynu. Pro ozubená kola se dnes v drtivé většině případů používá cementování v plynu. [12]

4.1.1 Cementování v plynu

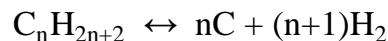
Podle Rakhita [12] je až 90 % cementovaných ozubených kol cementováno právě tímto způsobem. Jedná se o moderní, technologicky výhodný a produktivní způsob, jehož největší výhodou oproti ostatním způsobům je jeho naprostá kontrolovatelnost celého procesu nauhličení. To je umožněno možností měření nauhličujícího potenciálu v pecním prostoru. Měření je možné provést analýzou oxidu uhličitého, analýzou rosného bodu atmosféry nebo modernějším způsobem pomocí kyslíkové sondy. [18]

Podle způsobu cementace se v pecním prostoru nacházejí multikomponentní směsi plynů CO, CO₂, H₂, H₂O, CH₄ a N₂, k jejichž výrobě se využívá kapalných látek nebo plynů (zemní plyn, metanol, propan). Protože je pecní atmosféra kvůli vysokému obsahu CO a H₂ jedovatá, hořlavá a po smíchání se vzduchem výbušná, musí být z pece odváděná odsáváním do míst, kde vyhořívá. [18]

Pro přenos uhlíku mezi cementačním prostředím a cementovanou součástí jsou důležité následující reakce:

Boudouardova reakce: $2\text{CO} \leftrightarrow \text{C} + \text{CO}_2$

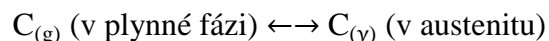
Reakce v nasycených uhlovodících
metanové řady:



Z těchto rovnic lze odvodit podmínky rovnováhy složek atmosféry s uhlíkem rozpuštěným v austenitu. Uhlík obsažený v plynné fázi v atomární formě C_(g) vyvoluje parciální tlak p_{C(g)}, který závisí na parciálním tlaku ostatních složek atmosféry, což vyjadřuje příslušná rovnovážná konstanta. Například z Boudouardovy reakce je to:

$$K_B = p_{\text{C(g)}} \cdot \frac{p_{\text{CO}_2}}{p_{\text{CO}}^2}$$

O tom, zda bude docházet k nauhličení nebo oduhličení součástí rozhoduje parciální tlak uhlíku. Přenos přes fázové rozhraní mezi prostředím a součástí je popsán rovnicí:



Pokud je uhlík rozpuštěný v austenitu, vytváří se určitý parciální tlak uhlíku v austenitu p_{C(y)}. O tom, ve kterém směru bude probíhat reakce, rozhoduje změna volné entalpie:

$$\Delta G = R \cdot T \cdot \ln \frac{p_{\text{C(y)}}}{p_{\text{C(g)}}}$$

Nauhličování bude probíhat, pokud bude volná entalpie $\Delta G < 0$, tedy když $p_{\text{C(g)}} < p_{\text{C(y)}}$. Protože parciální tlaky nelze snadno měřit, nahrazují se aktivitami. Po zjednodušení pak platí, že $a_{\text{C(g)}} = p_{\text{C(g)}}$. Z podmínky rovnováhy $\Delta G = 0$, $p_{\text{C(y)}} = p_{\text{C(g)}}$ a výše upravené rovnice pak plyne molární zlomek uhlíku v austenitu:

$$N_{C(\gamma)} = \frac{1}{\gamma_{C(\gamma)}} \cdot K_B \cdot \frac{p_{CO_2}}{p_{CO}^2}$$

Veličina $N_{C(\gamma)}$ se označuje jako nauhličující potenciál prostředí, který představuje rovnovážný obsah uhlíku na povrchu součásti. Pro jeho stanovení je nutné:

- Změřit parciální tlaky CO a CO₂
- Vypočítat $\gamma_{C(\gamma)}$ podle vztahu (platí pro binární slitiny Fe-C):

$$\gamma_{C(\gamma)} = \frac{1}{1-5N_C} \exp\left(\frac{4800}{T} - 1,48\right)$$

(N_C je celkový obsah uhlíku v oceli)

- Znat teplotní závislost K_B , která je určena experimentálně pro termodynamickou aktivitu uhlíku vztaženou ke grafitu jako standardnímu stavu:

$$\log K_B = \frac{8870}{T} - 9,06$$

Jsou-li v aktivním prostředí obsaženy nasycené uhlovodíky, např. metan, určuje se nauhličující potenciál i rovnovážná konstanta analogicky s předchozími rovnicemi:

$$K_M = p_{C(g)} \cdot \frac{p_{H_2}^2}{p_{CH_4}}$$

$$\log K_M = 5,77 - \frac{4650}{T}$$

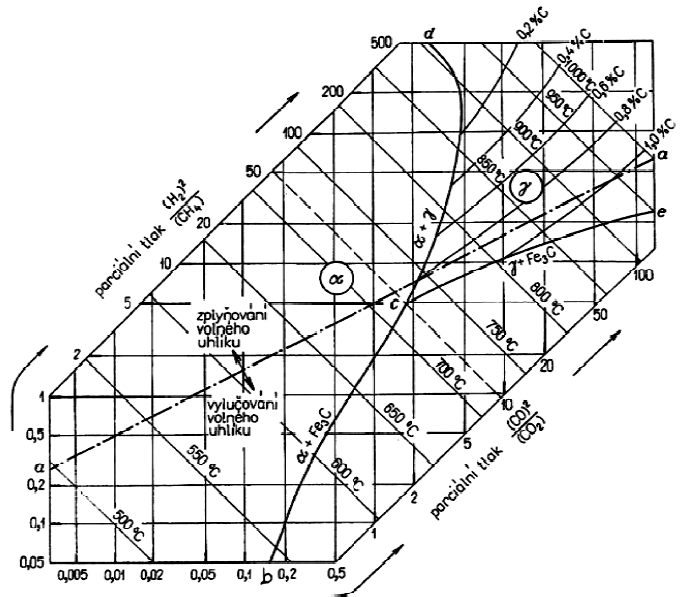
Odtud je možné odvodit nauhličující potenciál atmosféry s nasycujícími uhlovodíky:

$$N_{C(\gamma)} = \frac{1}{\gamma_{C(\gamma)}} \cdot K_M \cdot \frac{p_{CH_4}}{p_{H_2}^2}$$

Jak již bylo napsáno, reálné cementační atmosféry se skládají z multikomponentních směsí různých plynů, ve kterých dochází k ustavení termodynamické rovnováhy v dílčích soustavách, např. CO-CO₂ a CH₄-H₂. Rovnováha je určena rovností parciálních tlaků (aktivit) plynného atomárního uhlíku v každé z dílčích soustav:

$$a_{C(g)} = K_B \frac{p_{CO}^2}{p_{CO_2}} = K_M \frac{p_{CH_4}}{p_{H_2}^2}$$

Praktický význam spočívá v tom, že za rovnovážného stavu stačí znát parciální tlaky složek pouze jedné z dílčích soustav, aby bylo možné určit nauhličující potenciál aktivního prostředí. Pro posouzení nauhličujícího potenciálu cementačních atmosfér slouží Neumannův rovnovážný diagram C-CO-CO₂-H₂-CH₄ (obr. 14). [13][18]



Obr. 14 Neumannův rovnovážný diagram [18]

Regulace pecní atmosféry [19]

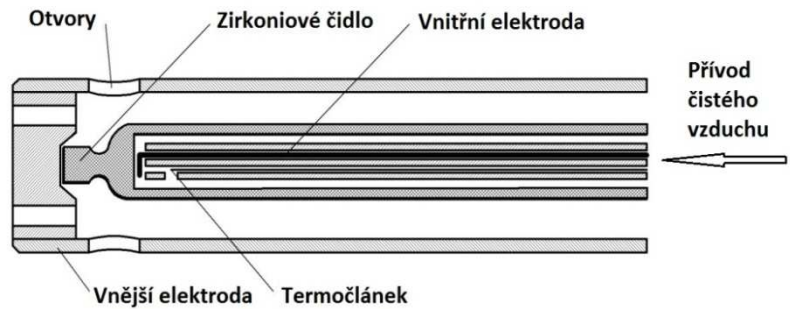
Měření teploty se provádí pomocí termočlánků, které musí být umístěny tak, aby co nejlépe snímaly rozložení teploty v celém pecním prostoru. Počet termočlánků závisí na požadavcích normy zákazníka a je úměrný velikosti a typu pece. Pro letecký a automobilový průmysl je požadováno měření teploty až v 10 bodech pracovního prostoru.

Hladinu uhlíku v cementační atmosféře je možné regulovat několika způsoby. Mezi klasické způsoby patří analýza oxidu uhličitého a analýza rosného bodu atmosféry. Mezi modernější a dnes již hojně používané metody patří řízení cementačních atmosfér pomocí kyslíkové nebo lambda sondy. V praxi se pro ověření a zpřesnění výsledků často používá zároveň dvou metod stanovení obsahu uhlíku (např. analýza oxidu uhličitého + kyslíková sonda).

Kyslíková sonda má oproti klasickým způsobům řadu výhod, jako je: vyšší přesnost stanovení obsahu uhlíku v atmosféře, rychlá reakce ve srovnání s analýzou CO₂, jednoduchá obsluha.

Kyslíková sonda (obr. 15) se skládá z kyslíkového senzoru ze ZrO₂, termočlánku, ochranné trubky a hlavice. Se zirkoniovým čidlem pokrytým platinou jsou v kontaktu dvě elektrody. Jedna elektroda tvoří vnitřní svod. Druhá elektroda v podobě ochranné trubky tvoří vnější svod. Trubka má vysokou pevnost, je odolná proti korozi a oxidaci při vysoké teplotě.

Oxid zirkoničitý ZrO_2 působí jako pevný elektrolyt, který při teplotách nad $700^\circ C$ vede kyslíkové ionty. Vodivost iontů způsobí vznik napětí mezi vnitřním a vnějším povrchem čidla. Velikost napětí je závislá na teplotě zirkoniového čidla a na poměru parciálních tlaků kyslíku na referenční a měřící straně pevného elektrolytu. Referenčním vzduchem je obvykle čistý vzduch s 20,9 % O_2 o průtoku cca 20 l/hod.



Obr. 15 Kyslíková sonda [19]

Kyslíková sonda by měla být umístěna v blízkosti ventilátoru, kde je reprezentativní teplota i složení atmosféry celé pece a co nejdále od dveří, či jiných pecních otvorů. Sondu je možné nainstalovat v jakémkoli úhlu. Přívod vzduchu do zirkoniového čidla má rozměr několik desetin milimetru, z toho důvodu je nutné přivádět dostatečně čistý vzduch, aby nedošlo k zanesení.

Kromě cementace je možné kyslíkovou sondu používat při tepelném zpracování v ochranné atmosféře, nitrocementaci a pro měření endotermického plynu.

Veličiny změřené v pecním prostoru (teplota, uhlíkový potenciál) jsou dále zpracovávány regulátorem, který vypočítává nauhličující potenciál a naměřená a vypočtená data ukládá do paměti a zobrazuje je v digitální formě prostřednictvím PC.

V tabulce 6 jsou uvedené některé používané cementační atmosféry:

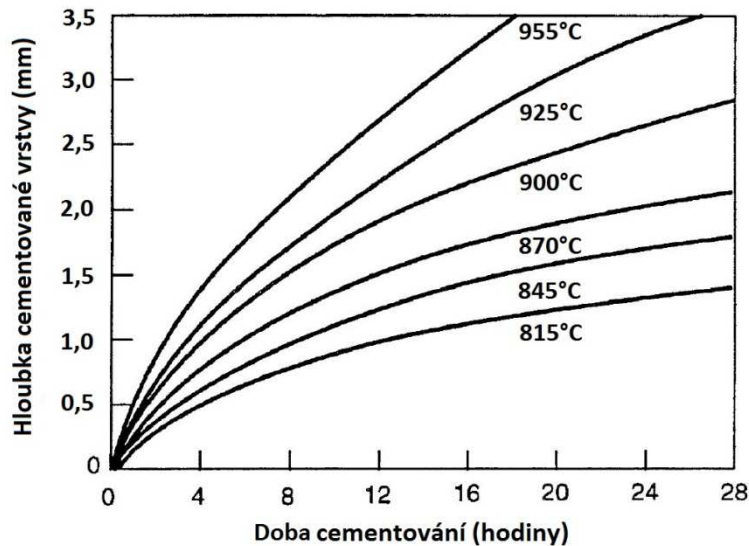
Vstupní atmosféra	Složení pecní atmosféry [%]				Stopové nečistoty [%]	
	N_2	H_2	CO	CH_4	H_2O	CO_2
Endoatmosféra + CH_4	37	40	18	5	0,05	0,1
N_2 - 20% CH_3OH + CH_4	37	40	18	5	0,05	0,1
N_2 - 17% CH_4 - 4% CO_2	70	16	7	7	0,005	0,05
N_2 - 20% CH_4 - 5% H_2O	55	28	10	7	0,01	0,05

Tab. 6 Cementační atmosféry [20]

Cementační teplota [12]

Cementační teplota leží nad křivkou A_3 , kdy je rozpustnost uhlíku v austenitu největší. Čím je teplota vyšší, tím je i větší difuzivita uhlíku. Obvykle se teplota při cementování pohybuje přibližně $40^\circ C$ nad teplotou A_3 . U cementovaných ozubených kol se teplota pohybuje mezi $790^\circ C$ a $985^\circ C$, avšak při teplotách nad $955^\circ C$ dochází ke značnému snížení životnosti pecí.

Důležitým faktorem při cementování je výdrž na cementační teplotě, která ovlivňuje hloubku nauhličené vrstvy (obr. 16).



Obr. 16 Hloubka cementované vrstvy v závislosti na cementační teplotě a době cementování [12]

Pro přibližný výpočet hloubky cementované vrstvy je možné využít následujících dvou rovnic. První rovnice (1) vyjadřuje vztah mezi hloubkou cementované vrstvy a dobou cementování:

$$d = \varphi \cdot \sqrt{t} \quad (1)$$

kde d je celková hloubka cementované vrstvy v palcích, t je doba nauhličení v hodinách a φ je veličina závislá na materiálu a mění se s teplotou cementování. Hodnota φ pro nízkouhlíkové a legované oceli při cementační teplotě 930°C v plynné atmosféře odpovídá 0,025. Pak platí:

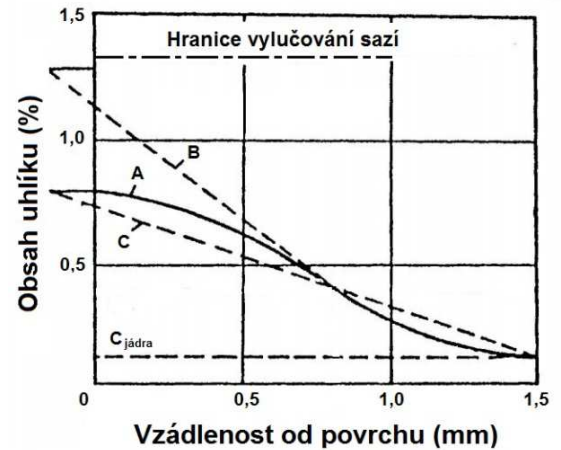
$$d = 0,025 \cdot \sqrt{t}$$

Druhá rovnice (2) počítá přímo s cementační teplotou a dobou cementování:

$$d = \frac{31,6 \cdot \sqrt{t}}{10 \cdot \left(\frac{6700}{T+460}\right)} \quad (2)$$

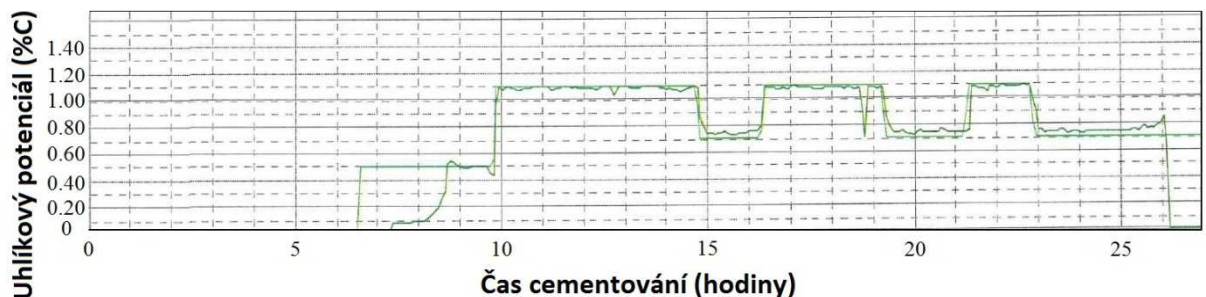
kde T je cementační teplota v °F. V praxi se používají obě dvě rovnice. Protože však výpočty neuvažují vliv složení a průtoku cementačního plynu, lze se jejich výsledky řídit pouze v případě cementování ozubených kol, u kterých není přesně stanovena hloubka cementované vrstvy.

Pro zkrácení doby celého procesu se cementování rozděluje na sytící a difúzní etapu (obr. 17). Sytící etapa probíhá při zvýšené teplotě a vysokém uhlíkovém potenciálu (cca 1,2 %C). Tím se dosáhne vysoké koncentrace uhlíku v povrchové vrstvě. Difúzní etapa probíhá při sníženém uhlíkovém potenciálu (cca 0,8 %C). Účelem je zajistit difúzi uhlíku směrem od povrchu součásti do jádra a částečně oduhlíčit povrch na konečnou hodnotu. Difúzní etapa odpovídá přibližně jedné čtvrtině celkové doby cementování a je zařazena za etapu sytící. Při cementování rozměrných ozubených kol vyžadujících větší hloubky cementované vrstvy (až 4,5mm) může difúzní etapa zaujímat až polovinu celkové doby cementování. Celý proces se pak provádí střídáním několika sytící a difúzních etap (obr. 18), čímž se zvýší difúzní tok uhlíku z povrchu do jádra a zabrání se vzniku nežádoucích karbidů v povrchové vrstvě.



Obr. 17 Koncentrační profily uhlíku při různých uhlíkových potenciálech atmosféry (T = 900°C), A-výsledný B-sytící, C- difúzní [13]

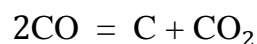
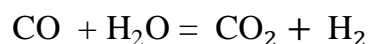
Snížení celkové doby cementování je závislé na rozdílu uhlíkových potenciálů obou etap a na jejich poměru.



Obr. 18 Průběh uhlíkového potenciálu během cementování ozubených kol

Oxidace povrchu[13]

Během cementování může docházet k oxidaci povrchu, která je způsobena nesprávným složením pecní atmosféry. Oxidy vzniklé na povrchu brání adsorpci atomů uhlíku a tím zpomalují proces cementace. Oxidační účinek má volný kyslík, CO₂ a H₂O. Naopak redukční účinek má CO, H a uhlovodíky. V pecní atmosféře dochází k následujícím reakcím mezi samotnými složkami atmosféry:



Aby nedocházelo k oxidaci, je nutné, udržet určitý poměr jednotlivých složek v atmosféře. Například oxidační účinek CO_2 a H_2O je nutné vyrovnat redukčním účinkem CO a H_2 . Příslušný poměr jednotlivých složek atmosféry v rovnováze je závislý na teplotě (obr. 19). Pokud je poměr $\text{H}_2\text{O}/\text{H}_2$ respektive CO_2/CO za dané teploty větší než rovnovážná konstanta, bude docházet k oxidaci (O), v opačném případě k redukcí (R). Stejným způsobem lze vyjádřit proces nauhličování (A) a oduhličování (E).

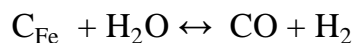
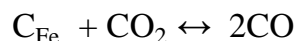
Při teplotách nad 700°C dochází k rovnovážné reakci vodního plynu, při které plyny reagují mezi sebou. Rovnovážnou reakce je možné vyjádřit její rovnovážnou konstantou:

$$K_p = \frac{p_{\text{CO}_2} \cdot p_{\text{H}_2}}{p_{\text{CO}} \cdot p_{\text{H}_2\text{O}}}$$

Z uvedeného vyplývá, že pro daný poměr CO/CO_2 se automaticky nastaví poměr $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ a naopak. V praxi proto stačí kontrolovat pouze jeden z těchto poměrů. Se stoupající teplotou má na oxidaci větší vliv CO_2 a menší vliv H_2O .

Oduhličování povrchu [21]

Dalším nežádoucím jevem při cementování je oduhličování povrchu. K oduhličování dochází při teplotách nad 700°C v prostředí pecní atmosféry, která obsahuje CO_2 , H_2O , H_2 a O_2 . Tyto molekuly reagují s atomy uhlíku na rozhraní atmosféra-povrch a tím povrch o uhlík ochuzují. Během cementování probíhá mnoho nauhličujících tak i oduhličujících reakcí současně.

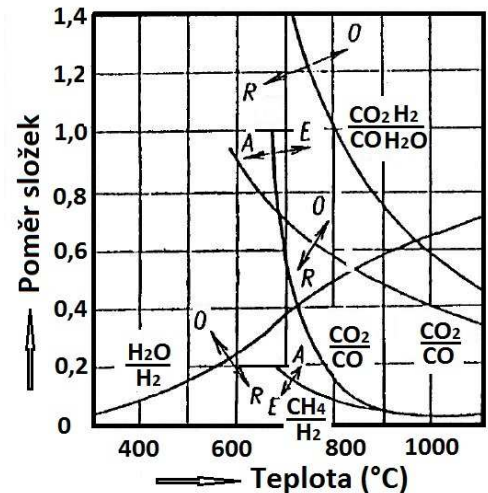


Pokud reakce probíhají směrem doprava, dochází k oduhličování. V opačném směru dochází k nauhličování. O tom, zda bude docházet k oduhličování nebo nauhličování rozhoduje teplota, průtok a složení pecní atmosféry (obr. 13).

Oduhličená vrstva se rozlišuje podle množství uhlíku na pásmo úplného oduhličení, které je tvořeno pouze feritem a pásmo částečného oduhličení, které je tvořeno feritem přecházejícím až do základní struktury. Při cementování ozubených kol je oduhličená vrstva do určité míry tolerována, protože jí lze broušením zcela odstranit.

Kalení

Po cementování je nutné ozubená kola kalit, aby nauhličená vrstva dosáhla požadovaných vlastností. Cílem kalení je dosažení povrchu s martenzitickou, případně bainitickou strukturou a jádrem tvořeným feritem a perlitem. Při volbě kalicího režimu je



Obr. 19 Závislost poměru složek atmosféry (rovnovážné konstanty) na teplotě při oxidaci a oduhličení oceli [13]

nutné zohlednit namáhání a podmínky, za jakých bude ozubené kolo pracovat, použitý způsob cementování a druh nauhličujícího prostředí. S ohledem na nepříznivé vnitřní pnutí po kalení, kvůli rozdílnému obsahu uhlíku na povrchu a v jádře, je nutné zvolit vhodné kalicí medium tak, aby bylo ochlazení dostatečně rychlé na vytvoření požadované struktury na povrchu, ale zároveň, aby nedocházelo k praskání povrchové vrstvy nebo nevznikalo nežádoucí vysoké množství zbytkového austenitu ve struktuře. V průmyslových a automobilových převodovkách se často režim kalení volí podle požadované povrchové tvrdosti, a to zejména v aplikacích, kde vlastnosti jádra nemají příliš velký vliv na funkci součásti. [12]

V závislosti na velikosti, tvaru a materiálu je možné ozubená kola kalit do vody, oleje nebo do solné lázně. Nejčastěji se používá olej, protože je vhodný pro široké spektrum cementačních ocelí. Zvláště vhodný je pro ozubená kola s relativně vysokým počtem menších zubů. Velice důležitým faktorem při kalení je také cirkulace chladícího media, která zajišťuje rovnoměrnost ochlazovacího účinku na povrchu ozubeného kola. [12]

V praxi se nejčastěji používají následující způsoby kalení po cementování (obr. 20).

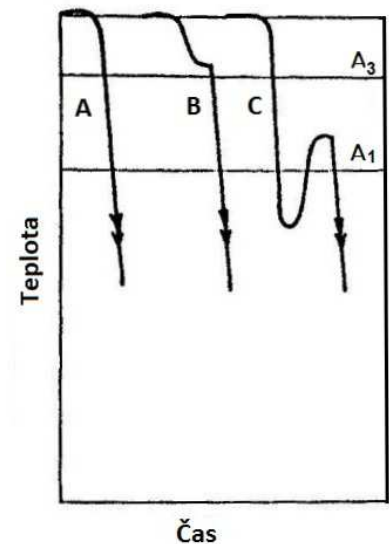
A) *Kalení z cementační teploty* - nejjednodušší a nejlevnější způsob kalení používaný na méně namáhané výrobky z uhlíkových ocelí. Protože je cementační teplota pro kalení příliš vysoká a setrvání na ní způsobuje zhrubnutí zrna, vzniká hrubá martenzitická struktura s velkým množstvím zbytkového austenitu. Kvůli rozdílu cementační teploty a teploty kalicí lázně vznikají v součástech značná vnitřní napětí a deformace. Výsledná vrstva má nižší tvrdost, menší odolnost proti únavě a je značně nebezpečí výskytu trhlin. [13]

B) *Kalení s přichlazením* - častější způsob používaný i pro více namáhané součásti. Po cementaci se součást ochladí na teplotu nad A_1 , na této teplotě se setrvá pro vyrovnání teplot v celém průřezu součásti a následuje kalení. Tím se oproti kalení z cementační teploty sníží velikost vnitřních napětí a deformací, a také množství zbytkového austenitu, avšak nedojde ke zjemnění zrna vlivem překrytality. [13]

C) *Kalení s podchlazením pod teplotu A_1* - nejpoužívanější způsob kalení zajišťující vysokou tvrdost povrchové vrstvy. Jádro součásti obsahuje určité množství feritu. Zrychleným ochlazením pod teplotu A_1 dojde k překrytality, a tím ke zjemnění zrna. Také vnitřní napětí a množství zbytkového austenitu je nižší. Dále se součást ohřeje na teplotu mezi A_1 a A_3 , ze které se zakalí. [13]

Po kalení je ve struktuře určité množství zbytkového austenitu, který může být zdrojem rozměrové nestability, zbytkového vnitřního napětí či prasklin. Větší množství zbytkového austenitu se vyskytuje v povrchové vrstvě s vysokým obsahem uhlíku a legujících prvků, a také při kalení z vysokých teplot. Vysoké množství uhlíku a legujících prvků snižuje teplotu počátku (M_s) a konce (M_f) martenzitické přeměny. Pokud se teplota M_f sníží pod teplotu okolí, nedojde k úplné martenzitické přeměně a ve struktuře zůstane určité množství zbytkového austenitu. [12]

Snížení zbytkového austenitu je možné provést zmrazováním, při kterém se součást podchladí tak, aby mohla proběhnout transformace zbytkového austenitu na martenzit. Tato



Obr. 20 Schéma způsobů kalení po cementaci [13]

přeměna, resp. množství přeměněného austenitu je závislá pouze na teplotě. Nejčastěji se zmrazování provádí v rozmezí teplot -75 až -100°C . Pro teploty do -75°C se používá suchý led smíchaný s petrolejem, trichloethylenem nebo alkoholem. Teplot pod -100°C se dosahuje pomocí relativně jednoduchého mechanického ochlazování. Ve výjimečných případech se pro dosažení teplot až do -196°C používá kapalný dusík.

Většina martenzitické přeměny je uskutečněna v prvním cyklu zmrazování. Vícenásobným zmrazováním schopnost transformace značně klesá. Množství přeměněného zbytkového austenitu při určité teplotě podchlazení je velice obtížné předpovědět, protože jej ovlivňují následující faktory[12]:

- časová prodleva mezi kalením a zmrazováním
- množství zbytkového austenitu na počátku zmrazování
- tepelné zpracování mezi kalením a zmrazováním
- výše zbytkového tlakového napětí v součásti
- jakékoli zpracování součásti zastudena (např. rovnání dlouhých rovných pastorků po cementování a kalení)

V tabulce 7 je uveden příklad snížení zbytkového austenitu pomocí zmrazování.

Zpracování	Zbytkový austenit (%)		
	Na povrchu	V hloubce 10 μm	V hloubce 30 μm
Cementování + kalení	14,7	21,8	9,2
Popouštění	16,5	18,5	10,7
Zmrazování při -25°C	10,6	18,6	11,3
Zmrazování při -75°C	6,7	11,0	6,7

Tab. 7 Vliv podchlazování na množství zbytkového austenitu v oceli 34CrMo4. Cementováno v plynu (920°C), kaleno z 850°C do oleje ($35 - 50^{\circ}\text{C}$), popouštěno při teplotě 160°C (2h) [22]

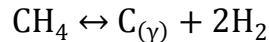
4.1.2 Cementování ve vakuu

Mezi modernější metody cementování patří cementování ve vakuu, jehož největšími výhodami oproti klasickému způsobu je kratší doba cementace, čistota procesu, opakovatelnost a zlepšení mechanických vlastností díky zamezení oxidace hranic zrn. Mezi nevýhody patří obtížná kontrola nahličující schopnosti atmosféry, požadavek vysoké přesnosti řízení procesu vyžadující přesné odzkoušení a v neposlední řadě vyšší pořizovací náklady na zařízení.

Cementování ve vakuu je možné rozdělit do čtyř kroků. V prvním kroku se součást ohřeje na teplotu 950 až 1050°C ve vakuu. Tlak se podle druhu pece liší. Pro pece s grafitovými topnými elementy se využívá tlaku 10 až 40Pa ; pro pece s křemíkovými topnými elementy 40 až 70Pa . Oceli s vyšším obsahem chromu, křemíku nebo jiných legujících prvků s vysokou afinitou ke kyslíku obecně vyžadují vyšší stupeň vakua.

Druhým krokem je sycení povrchu uhlíkem, při kterém je do komory pece vypuštěn čistý uhlovodík (např. propan, acetylen) nebo směs uhlovodíků s nízkým parciálním tlakem, který je závislý na teplotě, složení plynu a na konstrukci pece. Přenos uhlíku mezi

cementačním prostředím a součástí je zajištěn disociací uhlovodíku na povrchu součásti a přímou absorpcí uhlíku podle rovnice:



V pecích s grafitem se tlak při sycení pohybuje od 1 do 7kPa, u keramických pecí od 15 do 25kPa. Tlak by neměl překračovat 40kPa, protože nad touto hodnotou dochází k nadměrnému usazování uhlíku (sazení). Sytící stádium trvá přibližně 30 až 60 minut.

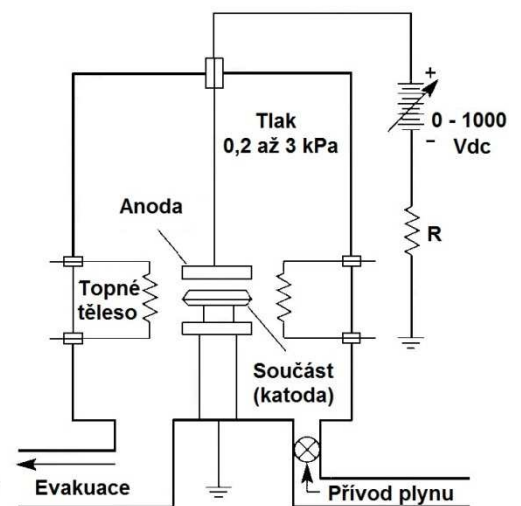
Třetím krokem vakuového cementování je difúzní stádium, při kterém dochází k oduhličování povrchu po předešlém sycení a k difúzi uhlíku od povrchu do jádra součásti. Difúzní stádium probíhá při stejné teplotě jako sytící. Tlak se pohybuje v rozmezí 70 až 135 kPa. Sytící stádium trvá přibližně 10 až 20 minut.

V posledním kroku se provádí tepelné zpracování. Protože jsou teploty při vakuovém cementování vyšší než při klasických způsobech cementování, dochází ke zhrubnutí austenitického zrna. Z tohoto důvodu je nutné součásti před samotným kalením ochladit dusíkem na teplotu 850°C. Kalení probíhá obvykle do oleje.

4.1.3 Plazmové cementování

Další progresivní metodou je plazmové cementování, které má oproti klasickému cementování v plynu řadu výhod. Podobně jako při cementování ve vakuu celý proces probíhá v evakuovaném prostředí bez přítomnosti kyslíku, což umožňuje vyšší teploty, a tím i rychlejší difúzi uhlíku do povrchu součásti. Díky tomu je cementační doba výrazně kratší. Další výhodou je rovnoměrnost nauhličené vrstvy i u složitých tvarů součásti, kterou zajišťuje vrstva plazmatu obklopující povrch. Oproti klasickému způsobu cementace v plynu je také menší spotřeba plynu. [17][18]

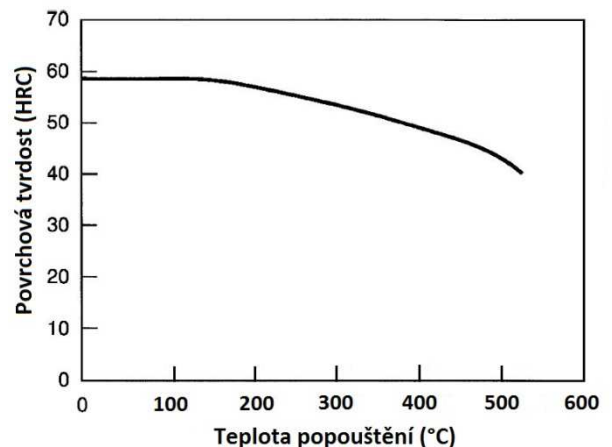
Samotné cementování (obr. 21) probíhá v pracovním prostoru, kde je umístěn pracovní stůl s cementovanou součástí (katoda). V blízkosti součásti je umístěna anoda, která je napájena vysokonapěťovým zdrojem. Do prostoru je vpouštěn metan nebo propan pod tlakem 0,2 až 3kPa. Díky potenciálovému rozdílu mezi katodou a anodou vzniká tenká vrstva plazmatu obalující povrch součásti. Díky zvýšené teplotě (cca 1050°C) je uhlíkový potenciál i difuzivita uhlíku podstatně vyšší než při cementování v plynu, což umožňuje výrazné zkrácení doby sytícího i difúzního stadia. Pro dosažení cementované vrstvy 1 mm stačí cca 10 minut sytícího a 30 minut difúzního stadia. Plazmovým cementováním lze dosáhnout tvrdosti povrchu až 66 HRC. [17][18]



Obr. 21 Schéma plazmového cementování [17]

Popouštění

Posledním tepelným zpracování při cementování ozubených kol je popouštění při nízkých teplotách, jehož účelem je snížení vnitřního napětí a zlepšení rozměrové stálosti. Teplota popouštění se obvykle pohybuje od 115 do 175°C. Se zvyšující se teplotou popouštění klesá povrchová tvrdost (obr. 22) i tvrdost jádra. Popouštění by mělo následovat v co nejkratším čase po kalení, aby nedošlo k praskání součásti. Na druhou stranu nesmí následovat příliš brzy, aby nedošlo k přerušení ještě probíhající martenzitické přeměny. Vlastnosti cementovaných, kalených a popouštěných součástí jsou povrchová tvrdost, pevnost a houževnatost jádra a dobrá mez únavy. Přestože popouštění probíhá při relativně nízkých teplotách, je nutné dbát na plynulost ohřevu a ochlazování z důvodu minimalizace vnitřního napětí ozubených kol. [12][13]



Obr. 22 Povrchová tvrdost zubů v závislosti na teplotě popouštění – ocel 21NiCrMo2 [12]

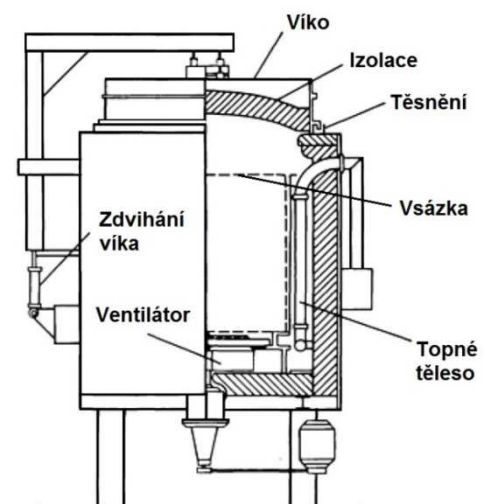
Pece pro cementování v plynném prostředí [12]

Pece pro cementování je možné rozdělit do různých skupin podle mnoha parametrů. Z tohoto důvodu se může rozdělení v různých literaturách lišit. V následujících odstavcích budou stručně popsány dva základní druhy cementačních pecí, jejich další rozdělení, a jejich výhody a nevýhody.

Prvním typem pecí pro cementování jsou **pece atmosférické**, které se mohou dále dělit na vsázkové, kontinuální a víceúčelové. Hlavní rozdíl mezi těmito pecemi, kromě velikosti, je manipulace se vsázkou.

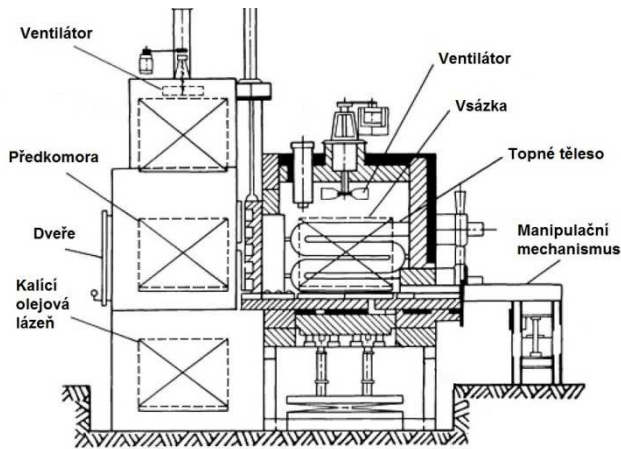
Jak již název napovídá, vsázkové pece jsou zakládány po jednotlivých dílech nebo v určitých dávkách. Jejich hlavní výhodou je variabilita prováděných procesů. Velká ozubená kola je možné cementovat po jednom, nebo v množství několika kusů. Menší ozubená kola lze cementovat po stovkách kusů v jedné vsázce. Největší nevýhodou vsázkových pecí je náhlá změna teploty ozubeného kola při zakládání pece, kdy je kolo o teplotě okolí vloženo do pece s vysokou teplotou cementace. Vlivem tepelného šoku může dojít k nežádoucím deformacím. Vsázkové pece se mohou být horizontální nebo šachtové (obr. 23).

Kontinuální pece jsou zakládány průběžně a jsou rozděleny na jednotlivé zóny (mohou být oddělené dvěma), kterými zpracovávána součást



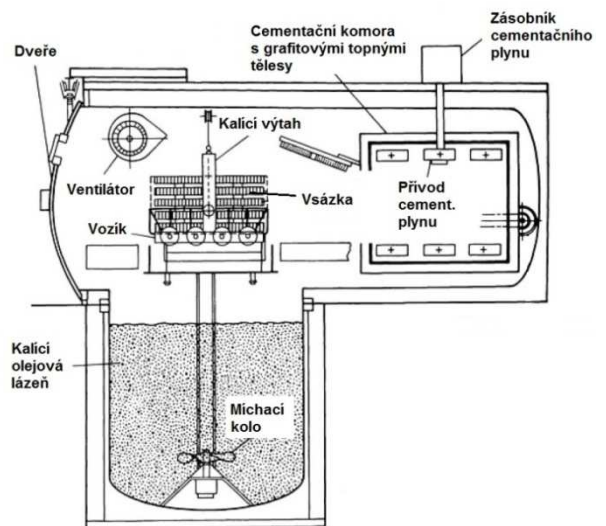
Obr. 23 Vsázková šachtová pec [23]

prochází. V jednotlivých zónách je možné regulovat teplotu a uhlíkový potenciál, a tím řídit sytící a difúzní stádium cementačního cyklu. Kontinuální pece jsou vhodné zejména pro hromadnou výrobu převážně menší součástí.



Obr. 24 Víceúčelová pec [23]

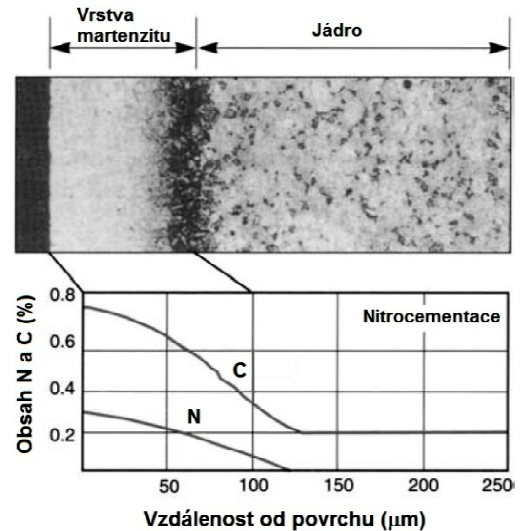
Dalším typem jsou **vakuové pece** (obr. 25), které mají oproti atmosférickým lepší charakteristiky přestupu tepla, a tím i lepší vlastnosti cementované vrstvy. Další výhodou je snížení času především při vyhřívání pece, kdy je součást vložena do studené pece a následně ohřívána na cementační teplotu. Při cementování ve vakuu nedochází k tak vysokým deformacím jako při cementování v atmosférických pecích. Hlavní výhodou cementování ve vakuu je snadnější regulace hloubky cementované vrstvy a to i na patě zubu ozubených kol. Největší nevýhodou vakuových pecí je jejich nákladný provoz.



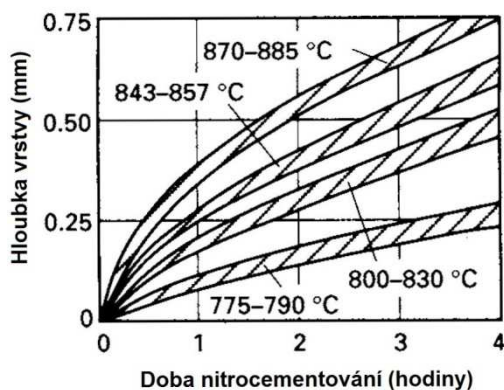
Obr. 25 Vakuová pec [23]

4.2 Nitrocementování ozubených kol

Nitrocementování je chemicko-tepelné zpracování principem podobné procesu cementování. Při nitrocementování je povrch součásti nasycován uhlíkem a dusíkem (obr. 26) při teplotách nižších, než jsou teploty cementační. Tato kapitola se zabývá převážně nitrocementováním v plynu, protože se jedná o nejrozšířenější způsob. Pro ozubená kola kalená do oleje nebo do vody se teplota nitrocementace pohybuje mezi 770 až 890°C (obr. 27). Hloubka nitrocementované vrstvy u ozubených kol bývá v rozmezí od 0,5 do 1 mm. Stejně jako po cementování je nutné nitrocementované součásti zakalit. Nitrocementované oceli je možné kalit do vody, do oleje nebo v plynu podle přípustných deformací, požadované tvrdosti vrstvy a jádra a typu pece. Ozubená kola z legovaných ocelí se obvykle kalí do oleje o teplotě 50 až 70°C. Následně se popouští při teplotě 190 až 200°C, aby se snížila křehkost vrstvy při zachování minimální tvrdosti 58 HRC. Popouštění se provádí také z důvodu předcházení vzniku trhlin při broušení. [11] [12]



Obr. 26 Povrchová vrstva vytvořená nitrocementováním při teplotě 850°C [23]



Obr. 27 Závislost doby nitrocementování a teploty na hloubce nitrocementované vrstvy [17]

austenitizované celé hmotě součásti. Na rozdíl od cementace tak nedochází při teplotách pod A_3 ke zpomalení růstu vrstvy a k vytvoření ostrého přechodu mezi jádrem a nitrocementovanou vrstvou. [11]

Dusík zvyšuje podíl zbytkového austenitu v zakalené nitrocementované vrstvě. Přítomnost zbytkového austenitu snižuje tvrdost vrstvy, brzdí vliv únavových trhlin, zvyšuje únavovou pevnost a plasticitu. Díky zvýšené plasticitě roste rázová houževnatost a také pevnost v ohybu. Při vysokém obsahu dusíku dochází na povrchu ke vzniku dutin a pórů. Z tohoto důvodu by neměl obsah dusíku v povrchové vrstvě překročit 0,4 %. [11] [13]

Největšími výhodami nitrocementace jsou relativně malé deformace a vysoká odolnost povrchu proti otěru. Díky dusíku mají nitrocementované vrstvy vyšší prokalitelnost, než vrstvy cementované (obr. 28), což umožňuje brousit ozubení bez výrazného snížení tvrdosti. Větší prokalitelnost také umožňuje nitrocementování ocelí, u kterých při cementování nelze dosáhnout rovnoměrné povrchové tvrdosti. Pokud nejsou kladeny vysoké požadavky na pevnost jádra, je možné nitrocementovat i nízkouhlíkové oceli. Při nitrocementování vysoko namáhaných ozubených kol z legovaných ocelí lze díky značné pevnosti jádra snížit tloušťku vrstvy, a tím zkrátit dobu nitrocementace oproti cementaci o 60 až 70 %. [11]

Nevýhodou nitrocementace může být komplikovanější udržování přesného množství plynů během procesu a omezení hloubkou vrstvy do 1 mm z důvodu pomalejšího růstu vrstvy. [13]

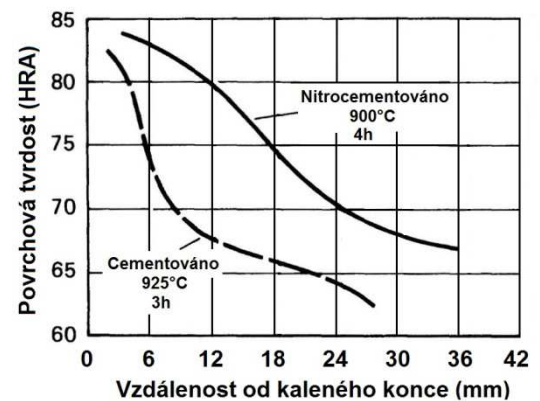
Převážná většina pecí pro cementování je vhodná i pro nitrocementování. Bez ohledu na velikost vsázky musí být pec vybavena ventilátorem pro rovnoměrnou cirkulaci atmosféry. Pokud je požadována vysoká čistota povrchu, musí celý proces nitrocementování probíhat v ochranné atmosféře. V šachtových pecích se jako zdroj nitrocementační atmosféry často používá přímo v peci rozložená kapalina Teral (40 % terpentýnu, 30 % acetonu, 30 % etylalkoholu) s přísadkou 20 až 30 % anilinu ($C_6H_5NH_2$) nebo pyridinu (C_5H_5N). Ve víceúčelových nebo průběžných pecích se často používá jako nosný plyn endoatmosféra, ke které se přidává 2 až 5 % CH_4 a 2 až 7 % HN_3 . [13]

K nitrocementování se mohou používat také solné lázně obsahující kyanidy nebo neutrální složky (např. 40 % $NaCl$, 30 % $NaCN$ a 30 % Na_2CO_3). Dalším způsobem je nitrocementování v prášku, při kterém se do cementačního prášku přidávají např. drcená rohovina nebo paznehty, jako zdroj dusíku. Pro nitrocementování pouze určitých částí součásti je možné použít pasty obsahující 10 až 20 % $K_4Fe(CN)_6$. Nitrocementování je také možné provádět pomocí plazmy. [13]

5 Napětí a deformace

Během celého technologického procesu výroby jakékoli ocelové součásti dochází k mnoha operacím, při kterých v součásti vznikají vnitřní napětí (pnutí). Překročením určité hranice napětí může docházet ke vzniku mikrotrhlin, případně k porušení celé součásti. Kromě vlivu tepelného a chemicko-tepelného zpracování na vnitřní pnutí jde především o důsledky tváření za studena, svařování, odlévání, obrábění, pájení aj. Tato kapitola se bude zabývat pouze vlivem tepelného a chemicko-tepelného zpracování na vnitřní pnutí. [13]

Vnitřní pnutí se podle časového působení může rozdělovat na dočasné a na zbytkové. Dočasné vnitřní pnutí působí, pokud trvá příčina, která jej vyvolala. Nejčastěji se jedná o nerovnoměrné rozložení teploty mezi povrchem a jádrem součásti během ohřevu nebo ochlazování. [13]



Obr. 28 Zkouška prokalitelnosti pro nitrocementovanou a cementovanou nízkouhlíkovou ocel. Tvrdost byla měřena na povrchu kaleného vzorku. 5% obsah NH_3 a CH_4 [11]

Pokud vnitřní pnutí přetrvává i po odstranění vnější příčiny, která jej vyvolala, jedná se o zbytkové vnitřní pnutí (zbytkové napětí). Zbytkové napětí vzniká v důsledku nehomogenní deformace a je možné ho definovat jako víceosé napětí, které v současti působí dlouhou dobu přesto, že je teplotní pole celé současti vyrovnané a na součást již nepůsobí žádné vnější síly. Pokud vnitřní napětí překročí pevnost dané oceli, dojde ke vzniku praskliny. Velice nebezpečná jsou tahová napětí zejména v blízkosti povrchu, proto je snaha dosáhnout na povrchu součastí napětí tlakových. Tlaková napětí na povrchu zvyšují mez únavy, což se využívá u cementování příp. nitrocementování. Dalším nepříznivým vlivem je trojosý stav napětí objevující se především u velkých odlitků a výkovků projevující se zkřehnutím oceli. [13][15]

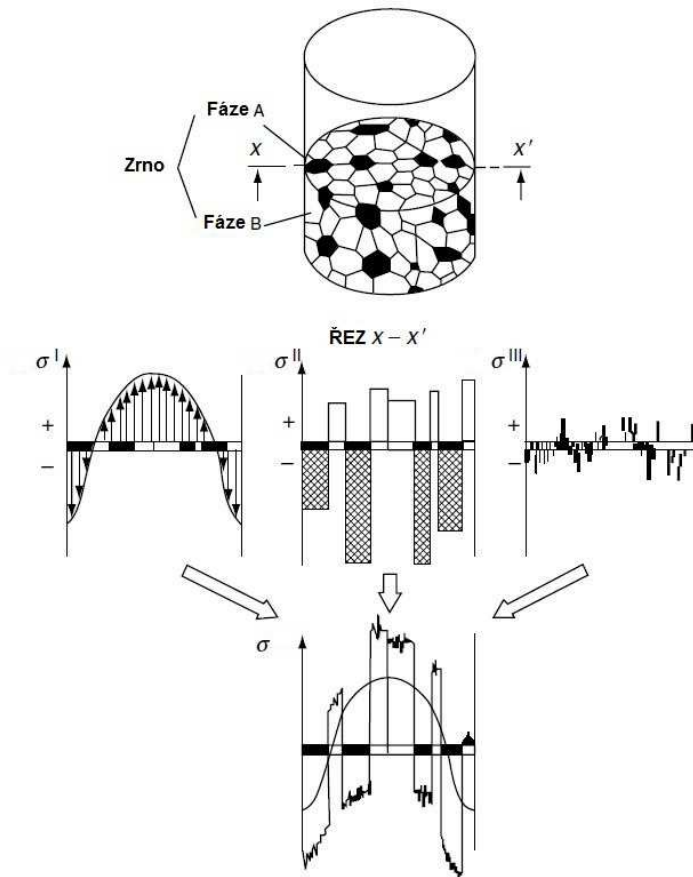
Během tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování dochází vlivem měnící se teploty v různých částech současti ke změnám objemu. Při kalení se díky rychlému ochlazení homogenní struktura austenitu postupně přeměňuje na heterogenní strukturu tvořenou několika fázemi, které se směrem od povrchu do jádra současti vlivem teplotního gradientu mění. Výsledná struktura po kalení je závislá na velikosti teplotního spádu a na složení oceli. Důsledkem rozdílných objemů jednotlivých fází a vysokého teplotního gradientu je vznik zbytkových napětí. [13][15]

5.1 Rozdělení pnutí podle objemu

Pnutí prvního druhu (makropnutí) zaujímají obvykle celý objem současti a jsou orientována ve vztahu k jejímu geometrickému tvaru. Mohou vzniknout například při obrobení současti, kdy dojde ke změně stavu napětí a součást se zdeformuje. Vznikají při každém ohřevu nebo ochlazení současti v důsledku nerovnoměrnosti přenosu tepla. U plastických ocelí schopných tvárné deformace se tato napětí v průběhu dnů až měsíců postupně zmenšují pomalou plastickou deformací. Změna pružné deformace v deformaci trvalou za současného snížení zbytkového napětí se nazývá relaxace. [13][15]

Pnutí druhého druhu (mikropnutí) působí v objemech srovnatelných s velikostí zrna a jejich orientace jsou náhodné bez souvislosti s geometrií současti. V celém objemu se mohou vzájemně vyrovnávat. Vznikají při fázové transformaci nebo při deformaci současti, kdy různá zrna či subzrna vykazují rozdílné stavy napětí. Změna stavu napětí v mikroobjemech nemá vliv na změnu tvaru současti. [13][15]

Pnutí třetího druhu (submikroskopické pnutí) působí v nepatrných objemech řádově velikosti elementárních buněk krystalové mřížky a nemají žádný vztah k tvaru současti. Jedná se o nehomogenní napětí vznikající elastickou distorzí mřížky. Příkladem jsou bodové mřížkové poruchy (vakance, intersticiální a substituční atomy). [13][15]



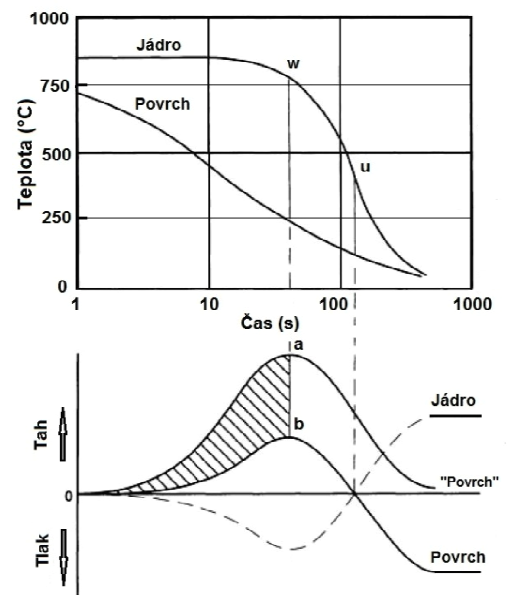
Obr. 29 Schematické znázornění superpozice tří druhů vnitřních pnutí po kalení v dvofázovém materiálu [38]

Výše uvedené druhy se nevyskytují v reálných součástech jednotlivě, ale působí současně. Výsledná vnitřní napjatost je pak výsledkem superpozice jednotlivých napětí (obr. 29). Protože se jednotlivá napětí vzájemně ovlivňují, může nárůstem napětí druhého druhu dojít ke vzniku napětí prvního druhu. [15]

5.2 Rozdělení pnutí podle příčiny vzniku

Tepelná pnutí jsou pnutí prvního druhu a vznikají v důsledku teplotního gradientu během tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování. Při kalení dochází k prudkému ochlazení povrchu součásti vlivem ochlazovacího media, avšak jádro je ochlazováno pouze vedením tepla ze středu směrem k povrchu. V součásti vzniká nerovnoměrné teplotní pole a v souladu s koeficientem teplotní roztažnosti a teplotou v daném místě dochází ke změně objemu. [13][15]

Na obrázku 30 je znázorněn průběh tepelných pnutí při kalení ocelové tyče o průměru 100 mm. Po ponoření tyče do kalícího media se rychleji chladnoucí povrchová vrstva tlačí na jádro a vyvolává v něm tlakové napětí, zatímco povrch je namáhán tahem. Povrchová vrstva má v okamžiku w cca o 500°C vyšší teplotu než jádro, což by odpovídalo délkové roztažnosti asi o 6 % a vzniklo

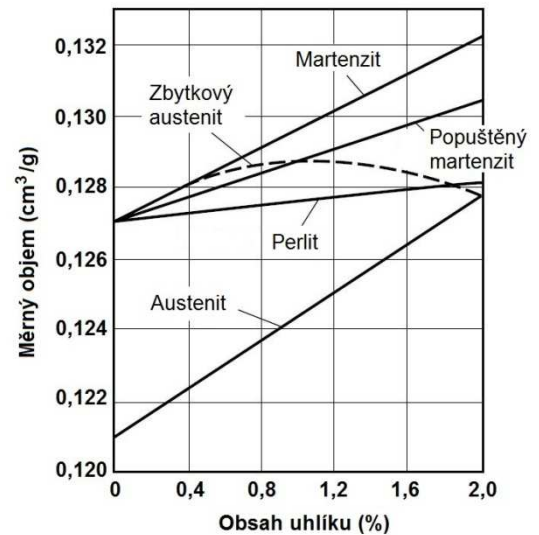


Obr. 30 Tepelná pnutí při kalení [23]

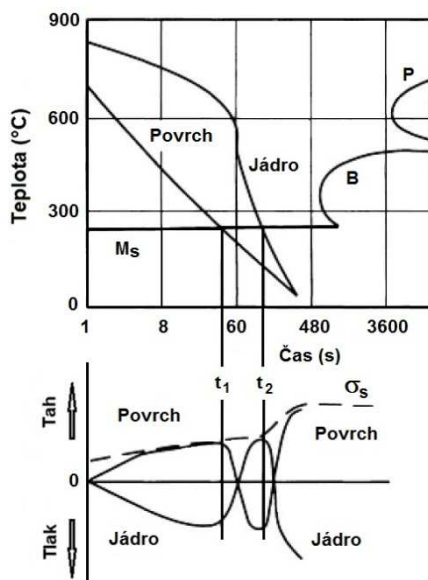
by napětí nad 1000 MPa. V takovém případě by napětí odpovídalo křivce a. Protože je však při vysokých teplotách snížena mez kluzu, skutečné napětí odpovídá křivce b. Dalším ochlazováním klesá teplota smršťujícího se jádra až do okamžiku u, kdy se napětí vyrovnávají. V čase u se jádro dále smršťuje a “vtahuje“ povrchovou vrstvu, která však již nemá z důvodu nízké teploty plastické vlastnosti. Mezi povrchem a jádrem tak vznikají značná napětí - v povrchové vrstvě tlaková a v jádře tahová. Z uvedeného je zřejmé, že velikost napětí závisí na rychlosti ochlazování a na druhu materiálu. [13][15][24]

Strukturní pnutí vznikají v materiálu vlivem rozdílných měrných objemů fází vyskytujících se při tepelném nebo chemicko-tepelném zpracování. Podle velikosti měrného objemu od nejmenšího k největšímu lze fáze seřadit následujícím způsobem: austenit, perlit, bainit, popuštěný martenzit a tetragonální martenzit (obr. 31). Objemový rozdíl mezi perlitem a martenzitem v uhlíkové oceli je asi 1 %. Rozdíl objemů v těžce oceli mezi austenitem a martenzitem činí více jak 2 %. [13] [15]

Při kalení dochází k rozpadu austenitu na martenzit, přičemž se krychlová mřížka austenitu přeměňuje, vlivem zadržení atomů uhlíku v mřížce, na tetragonální mřížku martenzitu. Zadržené atomy uhlíku v mřížce způsobují nárůst objemu, a tím i nárůst vnitřních pnutí, které se s rostoucím množstvím uhlíku zvětšují. Protože však tato pnutí vznikají v objemech řádově velikosti elementárních buněk mřížky (pnutí třetího druhu), v makroskopickém měřítku je jejich vliv zanedbatelný. [15]



Obr. 31 Měrný objem fází uhlíkové oceli při teplotě 20 °C, popuštěný martenzit (200 °C) [22]



Obr. 32 Strukturní pnutí při kalení [23]

Během kalení se při teplotě M_s v čase t_1 začne na povrchu tvořit vrstva martenzitu (obr. 32), která má větší měrný objem než ještě nezakalené jádro. To způsobí dočasné tlakové pnutí na povrchu a tahové v jádře. Dalším ochlazováním, kdy jádro dosáhne teploty M_s v čase t_2 začne vznikat martenzit také v jádře a zvětšený objem jádra způsobí tlak na již zpevněný povrch a vyvolá v něm tahové napětí (t_2), zatímco v jádře bude napětí tlakové. [15] [24]

V drtivé většině případů však při kalení nedochází k úplnému prokalení celé součásti, ale průřez součásti je tvořen přechodovými strukturami troostitu, jemného perlitu nebo bainitu a určitým množstvím zbytkového austenitu. Rozdíly objemů těchto struktur pak mohou vyvolat pnutí druhého druhu a způsobit mikrotrhliny. Povrchová vrstva martenzitu má větší objem než neprokalené jádro a působí na něj tedy tahovým napětím a sama je

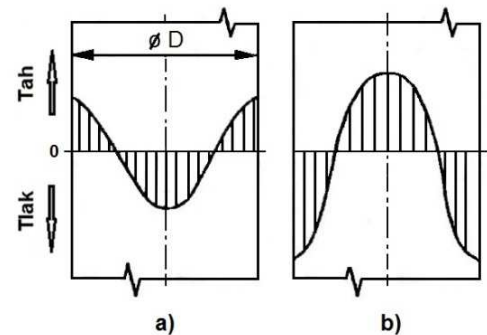
namáhána tlakem. Takto vznikají napětí prvního druhu. Čím je přechod mezi martenzitickým povrchem a neprokaleným jádrem ostřejší, tím větší napětí vznikají. [15]

Velký vliv na strukturní pnutí má podíl zbytkového austenitu, který má nejmenší měrný objem. V některých případech může díky své dobré tvárnosti vyrovnávat vnitřní pnutí plastickou deformací. Po kalení se však vlivem jeho nerovnovážnosti může rozpadat za současného růstu objemu, a tím zvyšovat vnitřní pnutí nebo dokonce způsobovat trhliny (např. při broušení zakalené nedostatečně popuštěné oceli). Z tohoto důvodu je velice důležitá dokonalá austenitizace oceli a dosažení homogenní struktury. Při nedostatečné austenitizaci může být ve struktuře při kalení z nízké teploty ferit, a v místech s vyšším obsahem uhlíku nebo přísadových prvků vznikne větší množství zbytkového austenitu. Větší množství zbytkového austenitu se objevuje také v okolí nerozpuštěného cementitu nebo karbidů. [15]

Během kalení oceli působí v materiálu současně tepelná a strukturní pnutí (obr. 33). Z tohoto důvodu je velikost výsledného pnutí dána buď jejich rozdílem, nebo součtem. Například na začátku kalení se vlivem ochlazování zmenšuje objem povrchové vrstvy (tepelné pnutí), zároveň se však začíná tvořit martenzit, a tím se objem zvětšuje (strukturní pnutí). Důsledkem je snižování tepelného pnutí pnutím strukturním, které má opačný smysl. V praxi jsou při kalení častější případy, kdy jsou fázová pnutí větší než pnutí tepelná. [13] [15]

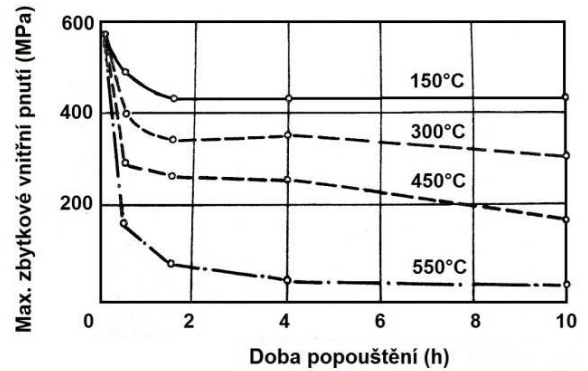
Značný vliv na konečnou hodnotu pnutí má tvárnost oceli při teplotách, kdy napětí vznikají, protože tvárné deformace mohou napětí vyrovnávat. Při překročení pevnosti materiálu však může dojít ke vzniku prasklin přímo při kalení (barevný povrch prasklin) nebo až po kalení (šedý povrch prasklin, barva oceli). Z uvedeného vyplývá, že legované oceli s vyšším modulem pružnosti a malou tvárností jsou náchylnější ke vzniku trhlin než oceli dobře tvárné. [15]

Podmínky kalení v praxi jsou však odlišné od podmínek ideálních, a proto je nutné brát v úvahu všechny faktory ovlivňující zbytková napětí popř. deformace. Reálný materiál vždy vykazuje určitý stupeň nehomogenity, ať už jde o rozdílnou koncentraci uhlíku nebo přísadových prvků v austenitu, nebo o různou velikost austenitického zrna v celém průřezu materiálu. Nedostatečnou austenitizací mohou zůstat v materiálu nerozpuštěné částice (karbidy, vměstky, atd.), které porušují nehomogenitu. Při příliš vysoké teplotě ohřevu může docházet k nepravidelnému růstu zrn, případně povrchovému oduhličení (v oxidační atmosféře). U tvarově složitých součástí při kalení do vody nebo oleje může například docházet k nedostatečnému zakalení míst, kde je špatná cirkulace chladícího media. [15]

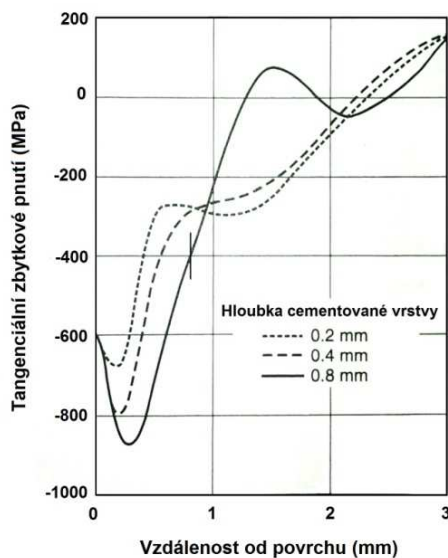


Obr. 33 Rozložení pnutí ve válcovém tělese
a) strukturní pnutí, b) tepelné pnutí
[13]

Po kalení je nutné zbytkové pnutí ihned po kalení snížit nebo úplně odstranit popouštěním. Pružné deformace se mohou přeměnit v plastické a tím se zvýší tvárnost oceli. Dále dochází ke strukturním změnám, které vedou ke snížení zbytkového napětí. Se zvyšující se teplotou popouštění klesá hodnota vnitřního pnutí (obr. 34). Při popouštění delším než 2 hodiny již nedochází k výraznějšímu poklesu zbytkového napětí. Popouštěním při teplotách cca 550°C dochází téměř k úplnému snížení pnutí vznikajících při kalení. [15]



Obr. 34 Vliv teploty a doby popouštění na velikost zbytkového vnitřního pnutí, ocel s 0,3 % C [15]



Obr. 35 Průběh napětí v povrchové vrstvě vzorku po cementování a kalení do vody [22]

Účelem některých způsobů chemicko-tepelného zpracování (cementování, nitrocementování, nitridování, apod.) nebo povrchových úprav (povrchové kalení, difúzní sycení, apod.) je dosáhnout příznivých tlakových pnutí v povrchových vrstvách. [13]

Rozložení tangenciálního zbytkového pnutí v cementované povrchové vrstvě vzorku o průměru 11,3 mm a délce 80 mm, vyrobeného z oceli DIN C22 (0,22 % C) a cementovaného do hloubky 0,2; 0,4 a 0,8 mm je na obrázku 35. Kalení probíhalo z 880°C do vody. [22]

5.3 Deformace

Průvodním jevem při tepelném a chemicko-tepelném zpracování jsou **deformace**. Přestože se jedná o nežádoucí jev, nelze jej zcela odstranit. V případě že vnitřní pnutí překročí mez pružnosti daného materiálu, dochází k nevratným změnám tvaru a rozměrů součástí. Deformace je možné rozdělit do dvou následujících skupin [13]:

Objemové změny jsou způsobeny změnou objemu při fázových přeměnách. Jedná se o změny objemu, které se dají relativně dobře předvídat. Při austenitizaci se objem ohřívané součásti smršťuje, zatímco vznik martenzitu po kalení způsobuje nárůst objemu. Proto se při zvyšujícím se množství uhlíku v martenzitu objemové změny zvětšují, a při zvyšujícím se podílu zbytkového austenitu se objemové změny zmenšují. Objemové přírůstky se zmenšují popouštěním, avšak u vysokolegovaných ocelí může dojít k dalšímu zvětšení rozměrů

z důvodu rozpadu zbytkového austenitu. Před samotným zpracováním lze objemové změny kompenzovat přídávky. [13]

Tvarové změny způsobují mnohem větší výrobní potíže než změny objemové. Vznikají z důvodu nerovnoměrného rozložení tepelných a transformačních pnutí. Tvarové změny jsou ovlivněny řadou faktorů od konstrukce součásti až po samotné tepelné nebo chemicko-tepelné zpracování. Příčinou těchto změn jsou kromě pnutí tepelných a strukturních také zbytková napětí, která v materiálu vznikla již při tváření (tvářecí textura) nebo obrábění (různý stupeň zpevnění povrchu). Snahou proto je veškerá pnutí v materiálu před samotným procesem tepelného nebo chemicko-tepelného zpracování odstranit (žhánání na odstranění pnutí). [13]

Jak z výše uvedeného vyplývá, vnitřní pnutí resp. deformace po kalení závisí na mnoha faktorech, které lze rozdělit následujícím způsobem [12] [15]:

- **kvalita oceli** – vlivem chemické nehomogenity, nevhodné orientace vláken po tváření, mikročistoty, nerovnoměrné velikosti austenitického zrna nebo tvar a rozmístění nerozpuštěných karbidů v austenitu se značně zvyšuje riziko vzniku vnitřních napětí.
- **druh a vlastnosti oceli** – vnitřní pnutí je tím větší, čím má ocel menší tepelnou vodivost, menší prokalitelnost, menší tvárnost, větší tepelnou roztažnost, hrubější austenitické zrno a větší objemové změny při vzniku martenzitu.
- **podmínky austenitizace** – vnitřní napětí zvyšuje nedokonalá austenitizace, nestejněměrné prohřátí, nerovnoměrná velikost zrna a oduhličení.
- **podmínky kalení** – riziko vnitřního pnutí se zvětšuje s velikostí rozdílu teplot kaleného předmětu a kalící lázně, s ochlazovací intenzitou lázně a s nedůsledným dodržováním samotného kalícího procesu (čistota předmětu, správná lázeň, atd.), důležitým faktorem je také způsob ponořování předmětů do kalící lázně
- **velikost a tvar kaleného předmětu** – se vzrůstajícím průřezem součásti vzrůstají i vnitřní pnutí z důvodu rozdílu teplot mezi povrchem a jádrem; vnitřní pnutí také vznikají např. v ostrých přechodech, hranách, zápíchách apod.

Nejobvyklejším způsobem odstraňování objemových a tvarových změn je obrábění (broušení). V některých případech lze deformace odstranit rovnáním buď zatepla, nebo zastudena. Rovnání je však náročné nejen z hlediska pracnosti, ale i z hlediska rizika porušení součásti. Jiným způsobem odstranění deformací je překalení, kdy se součást vyžháná, vyrovná a znovu zakalí, avšak tento způsob je značně nevhodný. [13]

6 Experimentální posouzení dodaného stavu polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6

6.1 Výběr dodavatele a kontrola dodaného stavu polotovaru

Jak již bylo zmíněno, výchozí stav a kvalita polotovaru před samotným tepelným nebo chemicko-tepelným zpracováním má značný vliv na kvalitu konečného výrobku. Pro cementovaná ozubená kola je jakost polotovaru závislá na kvalitě vstupního materiálu a způsobu zpracování oceli ve slévárně a následném způsobu tváření v kovárně. Je zřejmé, že se kvalita polotovarů může značně lišit, ať už z důvodu rozdílných technologií výroby, kvality vstupního materiálu nebo nedodržování technologických postupů.

Úkolem dané firmy by proto měla být snaha najít dodavatele, který bude dodávat polotovary odpovídající kvality za co nejnižší cenu. Dalšími kritérii při výběru dodavatele jsou v neposlední řadě dodací lhůta a doba splatnosti. Vlivem zvyšující se konkurence je však v současnosti kladen důraz především na cenu nakupovaného materiálu. To může mít za následek snížení kvality polotovarů a s tím spojené problémy při samotné výrobě ozubených kol. Náklady spojené s opravami vzniklých vlivem nekvalitního materiálu pak mohou převyšovat finanční prostředky ušetřené nákupem levnějšího polotovaru. Cílem by proto měla být dostatečná kontrola dodávaného materiálu a maximální snaha zajistit polotovary předepsané kvality.

Po obdržení polotovaru danou firmou je nutné provést vstupní kontrolu, která je zaměřena na ověření shodnosti dodaného polotovaru s příslušnou objednávkou, kupní smlouvou a ostatními specifikacemi. Vstupní kontrola obvykle zahrnuje: neporušenost obalů, kompletnost dodávky, rozměrové parametry, vizuální kontrolu, kompletnost požadovaných atestů od dodavatele, různé způsoby zjišťování vnitřních nebo povrchových vad (např. kapilární zkoušky, zkouška ultrazvukem) apod. Současně s polotovarem se často dodává tzv. doprovodný vzorek (kontrolní vzorek), kterým je zkušební těleso stejné tavby jako polotovar. Zkušební těleso doprovází polotovar celým procesem chemicko-tepelného zpracování a mělo by podávat informace o závislosti chemicko-tepelného zpracování na nauhličování a mikrostrukturu. Podrobnosti týkající se výroby doprovodného vzorku závisí na dohodě mezi dodavatelem a zákazníkem.

6.2 Cíle experimentální části práce

Cílem experimentální části diplomové práce bylo posoudit stav polotovarů z hlediska kvality materiálu používaných pro výrobu rozměrných cementovaných ozubených kol převodovek větrných elektráren. Polotovarem jsou výkovky z oceli 18CrNiMo7-6 dodávané ve feriticko-perlitickém (FP) stavu. Na základě výsledků hodnocení měly být pro tyto polotovary navrženy změny dodacích podmínek.

Posuzované vlastnosti pro hodnocení kvality materiálu byly zvoleny na základě české verze mezinárodní normy ČSN ISO 6336-5: *Výpočet únosnosti čelních ozubených kol s příkými a šikmými zuby – Část 5: Údaje o pevnosti a kvalitě materiálů*, vnitropodnikové normy společnosti, která dodala vzorky pro tento experiment a na základě doporučení řešitelů projektu, jehož součástí je i tato diplomová práce. V tabulce 22 (viz. příloha č. 1) jsou uvedeny některé požadavky na kvalitu cementovaných ocelí podle ČSN ISO 6336-5 pro ozubená kola stupně kvality ME (nejvyšší požadavky na kvalitu materiálu a tepelné zpracování během výroby ozubeného kola).

Požadavky na materiál zmíněné společnosti jsou chemické složení, stupeň prokovaní, mikročistota, velikost austenitického zrna a prokalitelnost. Stupeň prokovaní by pro konvenčně litou ocel měl být minimálně: pro nepodélné výkovky 5:1, pro podélné 3,5:1. Pro přetavenou ocel je požadován stupeň prokovaním min. 2,5:1. Ingoty je možné použít minimálně osmihranné. Mikročistota musí být posuzována podle normy ISO 4967, metodou B. Maximální přípustné hodnoty vměstků jsou uvedeny v tabulce 8. Požadovaná velikost austenitického zrna je velikost 6 a jemnější. Hodnocení musí být prováděno podle normy ISO 643. Prokalitelnost musí být stanovena podle normy ISO 642. Požadován je zúžený pás prokalitelnosti směrem k horní hranici (+HH).

A		B		C		D	
Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý
1,5	1,0	1,5	1,0	1,0	1,0	1,5	1,0

Tab. 8 Maximální přípustné množství vměstků podle vnitropodnikové normy

Zvolené posuzované vlastnosti pro tuto práci byly mikročistota, velikost austenitického zrna, řádkovitost, mikrostruktura a tvrdost HV₁₀. Níže budou podrobněji popsány způsoby hodnocení prvních tří zmíněných vlastností.

6.3 Hodnocení materiál

Hodnoceným materiálem polotovarů pro cementovaná ozubená kola je podle ČSN EN 10084 ocel 18CrNiMo7-6. Jedná se o středně legovanou ušlechtilou chrom-nikl-molybdenovou ocel k cementování, která se používá pro velmi namáhané strojní součásti (vodná pro dynamické namáhání). Cementovaná vrstva po kalení dosahuje tvrdosti 62 až 64 HRC, zatímco jádro součásti je i při relativně vysoké pevnosti značně houževnaté. Přísada Mo zvyšuje prokalitelnost. Níže jsou vlastnosti oceli 18CrNiMo7-6 podrobněji specifikovány. Pásy prokalitelnosti a popouštěcí křivka jsou uvedeny na obrázcích 86 a 87 (viz. příloha č. 2). [14]

Chemické složení oceli 18CrNiMo7-6 v % hmot.							
C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
0,15	max.	0,50	max.	max.	1,50	0,25	1,40
-	0,40	-	0,035	0,035	-	-	-
0,21		0,90			1,80	0,35	1,70
Dovolené odchylky ve výrobku od rozboru tavby ¹⁾							
± 0,02	+ 0,03	± 0,04	+ 0,005	+ 0,005	± 0,05	± 0,03 ²⁾	± 0,05

1) ± znamená, že u jedné tavby může být překročena horní nebo spodní hranice rozmezí rozboru tavby, ale nikoli obě současně.

2) Pro obsah molybdenu větší než 0,30 % je odchylka ± 0,4 %.

Tab. 9 Chemické složení oceli 18CrNiMo7-6 [14]

Mechanické vlastnosti v jádře referenčního vzorku po kalení a popouštění při 150 - 200 °C ³⁾				
Průměr [mm]	R _{p0,2 min} [MPa]	R _m [MPa]	A _{min} [%]	KCU _{min} [J·cm ⁻²]
d ≤ 11	980	1230 - 1520	9	30
11 < d ≤ 25	735	980 - 1320	9	35
25 < d ≤ 50	640	885 - 1080	10	35
50 < d ≤ 100	490	685 - 980	11	35

3) Slouží k průkazu dosažitelnosti mechanických hodnot v jádře odpovídajícího průřezu referenčního vzorku po kalení a popouštění (uvedené hodnoty nejsou součástí EN 10084).

Tab. 10 Mechanické vlastnosti oceli 18CrNiMo7-6[14]

Hodnoty tvrdosti HB pro různé způsoby zpracování			
Zpracováno na stříhatelnost (S)	Žiháno na měkko (A)	Zpracováno na rozsah tvrdosti (TH)	Zpracováno na feriticko-perlitickou strukturu (FP)
max. 255	max. 229	179 - 229	159 - 207
Stav po válcování	Stav po normalizaci (N)	Žiháno na lobulární cementit (vhodné pro tváření za studena)	
cca 270 ⁴⁾	cca 260 ⁴⁾	max. 180 ⁴⁾	

4) Uvedené údaje jsou informativní a nejsou součástí EN 10084.

Tab. 11 Hodnoty tvrdosti oceli 18CrNiMo7-6 [14]

Tepelné zpracování (°C)			
Normalizační žihání	Žihání na měkko	Izotermické žihání	Teplota cementace ⁵⁾
850	600 - 680	850 - 950, 640 - 3h	880 - 980
Teplota kalení na jádro	Teplota kalení na vrstvu	Teplota popouštění ⁶⁾	Teplota kalení pro Jominyho zkoušku
830 - 870, olej	780 - 820, olej	150 - 200	860 (výdrž cca 0,5h)

Uvedené údaje jsou doporučené:

5) Při jednoduchém kalení se ocel kalí z teploty cementace nebo nižší (závisí na tvaru výrobku).

6) Doba popouštění minimálně 1 hodina.

Tab. 12 Doporučené teploty tepelného zpracování oceli 18CrNiMo7-6 [14]

Tváření zatepla	Doporučené rozmezí teplot je 1100 až 900 °C
Obrobitelnost	Pro dobrou obrobitelnost je výhodný stav FP případně stav A
Střihatelnost	Ocel je střihatelná zastudena ve stavu žíhaném

Tab. 13 Další technologické vlastnosti oceli 18CrNiMo7-6 [14]

Pro tuto práci bylo původně k dispozici 42 vzorků, avšak pouze 19 vzorků bylo v požadovaném FP stavu. V této práci proto bylo hodnoceno pouze těchto 19 vzorků. Z tohoto důvodu je číslování vzorků nepravidelné. Označení W11 nebo W12 poukazuje na rok, v jakém byly vzorky hodnoceny. Vzorky byly pořízeny z polotovarů pocházejících od sedmi různých dodavatelů.

6.4 Posuzované vlastnosti

6.4.1 Mikročistota [26]

Při posuzování mikročistoty oceli nebo slitin se stanovuje stupeň znečištění materiálu nekovovými vměstkami. Vměstky porušují celistvost kovové hmoty a jsou rozhodujícím činitelem jeho jakosti a užitých vlastností (houževnatost, odolnost proti pittingu, únavové vlastnosti apod.). Nekovové vměstky mohou v oceli nebo slitinách vznikat reakcemi mezi kovem a v tavenině přítomným kyslíkem, dusíkem, sírou nebo fosforem (endogenní vměstky), nebo jsou to uvolněné částice z vyzdívek pecí nebo licích soustav (exogenní vměstky).

Endogenní vměstky se dělí na sulfidy, oxidy, nitridy, hlinitany a křemičitany. Nejčastějšími sulfidy v oceli jsou sulfid železnatý a sulfid manganatý (tab. 14). Oba sulfidy se také mohou vzájemně rozpouštět.

Sulfid železnatý (FeS)	Pod mikroskopem v odraženém světle má světložlutou barvu. Má nepravidelný tvar se zaoblenými konci.
Sulfid manganatý (MnS)	V odraženém světle má světlešedou barvu. MnS a tuhý roztok FeS – MnS jsou tvárné.

Tab. 14 Vlastnosti sulfidu železnatého a sulfidu manganatého [26]

Oxidy se v oceli vyskytují ve formě sloučenin nebo ve formě jednoduchých. Z jednoduchých oxidů jsou to především oxid železnatý, oxid manganatý, oxid křemičitý a oxid hlinitý (tab. 15).

Oxid železnatý (FeO)	V oceli se vyskytují převážně ve globulitickém tvaru. Má šedou barvu.
Oxid manganatý (MnO)	Je globulitického tvaru a má tmavou barvu.
Oxid křemičitý (SiO ₂)	Většinou se vyskytuje v globulitickém tvaru a v odraženém světle má tmavě šedou barvu. Špatně se leští a snadno vypadává z leštěného povrchu
Oxid hlinitý (Al ₂ O ₃)	Má nepravidelný tvar a v odraženém světle je tmavošedý. Má vysokou tvrdost a obtížně se leští.

Tab. 15 Vlastnosti oxidu železnatého, oxidu manganatého, oxidu křemičitého a oxidu hlinitého [26]

Nitridy se mohou vyskytovat v ocelích s vyšším obsahem dusíku. V běžných ocelích se nevyskytují. Ve slitinových ocelích se nejčastěji vyskytuje nitrid titanu TiN, který je velice tvrdý, a který vytváří pravidelné krychlové útvary nazlátlé barvy.

Mezi složitější vměstky vyskytující se v oceli patří hlinitany (tab. 16) a křemičitany (tab. 17).

Hlinitan železa (FeO·Al ₂ O ₃)	Vytváří zrna často hrubší než zrna Al ₂ O ₃ a v odraženém světle je tmavošedý. V oceli vzniká v důsledku příliš malého množství hliníku a velkého množství kyslíku při malém množství uhlíku a křemíku v tavenině.
Hlinitan manganu (MnO·Al ₂ O ₃)	Má podobné vlastnosti jako hlinitan železa. V odraženém světle má hnědožlutou barvu. Vzniká v důsledku vysokého množství manganu, většího množství kyslíku a malého množství hliníku. S hlinitanem železa může vytvářet tuhé roztoky tmavošedé barvy.

Tab. 16 Vlastností hlinitanu železa a hlinitanu manganu [26]

Ortokřemičitan železa (2FeO·SiO ₂)	Jeho barva závisí na poměru kyslíku a přidávaného křemíku, základní barva je tmavě šedá. Je tvrdý, dobře se leští a nevytlumuje se z plochy výbrusu.
Křemičitan železa a manganu (směs FeO, MnO a SiO ₂)	Je podobný vměstkům oxidu křemičitého, má však tmavší barvu.
Křemičitan vápníku	Vytváří jemné tmavošedé částice kulovitěho tvaru, které nejsou tvařitelné. Vzniká při dezoxidaci silikokalcem.

Tab. 17 Vlastnosti ortokřemičitanu železa, křemičitanu železa a manganu a křemičitanu vápníku [26]

Exogenní vměstky jsou obvykle uvolněné části vyzdívky pece, odpichového žlabu, pánve, licích kanálků nebo částice strusky. Tyto vměstky mohou negativně ovlivňovat mechanické vlastnosti ocelí v důsledku vyvolávání vnitřního pnutí vrubovým účinkem; způsobování anizotropie mechanických vlastností ve tvářených součástech; mohou být příčinou únavového lomu u dynamicky namáhaných součástí; snižují odolnost proti opotřebení a korozní odolnost; tvrdé vměstky mohou snižovat obrobiteľnosť apod.

Vměstky v oceli je možné určovat dvěma způsoby, chemicky (elektrochemicky) nebo metalograficky.

Při **elektrochemickém způsobu** se vměstky izolují a jsou podrobeny chemické analýze, která určí jejich chemické složení. Tímto způsobem lze zjistit pouze celkové množství a chemické složení, ne však jejich velikost, tvar a rozložení.

Při **metalografickém hodnocení** lze využít dvou metod, metody srovnávání pozorovaných ploch se stupnicí vměstků nebo metody početního stanovování obsahu a velikosti nečistot. Metalografické hodnocení se provádí na vyleštěném nenaleptaném povrchu vzorku ve světlém nebo tmavém poli.

a) Srovnávací metody pro posuzování mikročistoty

Pro svoji jednoduchost se srovnávací metody v praxi používají nejčastěji. Patří sem např. srovnávací metoda podle mezinárodní normy ISO 4967 (česká verze ČSN ISO 4967), podle švédské stupnice Jernkontoret, americké normy SAE J422 nebo ruské normy GOST 1778-70. Všechny uvedené srovnávací metody jsou principiálně podobné. Níže jsou podrobněji popsány dvě vybrané metody.

Podle tabulky **Jernkontoret** jsou vměstky rozděleny do čtyř skupin: syrniky (sulfidy) - (S), kysličníky (oxidy) hliníku - (B), křemičitany - (B), globulární kysličníky (oxidy) - (D). Vměstky jsou u každé skupiny rozděleny do dvou podskupin podle šířky vměstků v μm . Počet vměstků v dané skupině je pro obě podskupiny stejný. Čistota je rozdělena na pět stupňů od hodnoty 1 (nejmenší znečištění = nejmenší celková délka vměstků) do 5. Hodnocení se provádí při stonásobném zvětšení.

Hodnocení mikročistoty podle normy **ISO 4967 (ČSN ISO 4967)** je velice podobné hodnocení podle tabulky Jernkontoret). Vměstky jsou rozděleny do pěti skupin: sulfidický typ - (A), hlinitanový typ - (B), silikátový typ - (C), typ globulárních oxidů - (D), typ jednotlivých globulí - (DS). Vměstky jsou opět v každé skupině rozděleny podle šířky v μm na podskupiny jemný a hrubý. Množství vměstků (celková délka) se posuzuje podle šesti skupin od 0,5 do 3. Hodnocení se provádí při stonásobném zvětšení. [27]

Pro vyhodnocování mikročistoty srovnávacími metodami je možné použít tři způsoby:

- Vyhodnocování podle **největšího množství vměstků** pro každý druh vměstku zvlášť na celém výbrusu nebo jeho části.
- Vyhodnocování podle **středního stupně znečištění**, při kterém se daná plocha rozdělí na předem stanovený počet zorných polí. Zjišťuje se počet stupňů znečištění a jeho celková hodnota. Z těchto údajů se pak vypočítává střední hodnota znečištění. Počet zvolených zorných polí ovlivňuje přesnost výsledného údaje.
- Vyhodnocování podle **středního stupně znečištění** s vyjádřením mikročistoty pomocí **křivky četnosti** výskytu jednotlivých vměstků.

V praxi se nejčastěji používají první dva způsoby vyhodnocování. Hlavní výhodou prvního způsobu je určení nejznečištěnějšího místa. Na rozdíl od druhého způsobu však nepodává informace o výskytu menších vměstků a jejich počtu. Pomocí druhého způsobu je možné objektivně zjistit celkové znečištění oceli, avšak bez určení maximální velikosti vměstků.

b) Metody početního určování mikročistoty

Pomocí této metody se mikročistota posuzuje podle množství a rozměrů vměstků. Z rozměrů vměstků je možné vypočítat jejich plochu a určit, jakou část výbrusu zaujmají. Při znalosti specifické hmotnosti vzorku a vměstků je pak možné vypočítat procentuální obsah nečistot. Jiným způsobem může být určení čistoty oceli na základě celkové délky všech vměstků. V praxi se tato metoda příliš nepoužívá.

6.4.2 Velikost austenitického zrna

Velikost austenitického zrna (primárního nebo sekundárního) má podstatný vliv na vlastnosti kovů a slitin. Čím jemnější zrna je, tím je vyšší vrubová houževnatost, vyšší únavové vlastnosti, menší sklon ke vzniku trhlin po kalení, v některých případech nižší odolnost proti creepu.

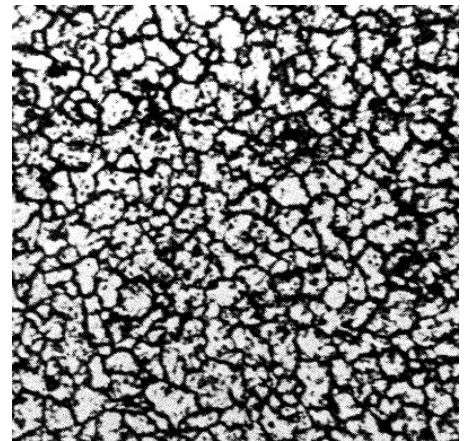
Protože však austenitické zrna existuje pouze nad teplotou A_3 resp. A_1 , musí být pozorovaný vzorek upraven tak, aby bylo možné určit hranice zrn i při normální teplotě. Metody pro určení velikosti austenitického zrna lze rozdělit do dvou skupin:

- Metody přímé (určení z lomu)
- Metody nepřímé (určení z mikrostruktury)

Při určování velikosti austenitického zrna **podle vzhledu lomu** se vzorek o rozměrech 20×100 mm zakalí, opatří příčnými vruby a přerazí. Zrnitost na lomové ploše se porovnává se stupnicí, kde stupeň 1 je nejhrubší a stupeň 10 nejjemnější zrna. Stupnici lze použít například podle Jernkontoreta nebo podle ASTM. Při tomto způsobu bylo zjištěno, že velikost austenitického zrna v původním materiálu má přímý vliv na velikost zrna po kalení.

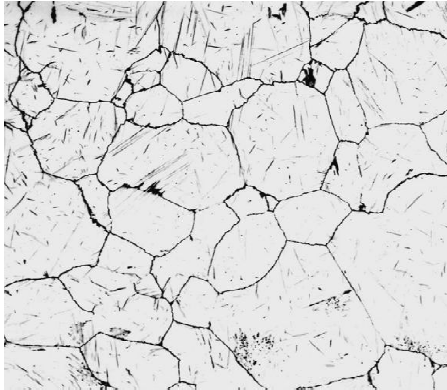
Metod pro vyvolání austenitického zrna pro určení jeho velikosti **z mikrostruktury** existuje mnoho a vhodnost jejich použití se podle druhu oceli liší. Níže jsou uvedeny tři vybrané způsoby vyvolání austenitického zrna.

Oxidační metoda (Herasymenkova) - využívá zvýšené schopnosti oxidace hranic austenitických zrn při vysokých teplotách (obr. 36). Obroušené vzorky se ohřívají v peci v oksydující atmosféře při teplotě cca 930°C po dobu 3 hodin. Na obroušeném povrchu vzorku se během této doby vytvoří oxidický film (cca 10^{-2} mm) obalující zrna austenitu. Po ohřevu následuje ochlazení ve vodě. Obrousí se oksydující vrstva a povrch se vyleští (nesmí však dojít k úplnému odbroušení oxidického síťoví). Nakonec se povrch leptá obvykle 15% roztokem kyseliny solné v etylalkoholu po dobu 2 až 10 minut. Tato metoda je vhodná pro široké spektrum uhlíkových nebo slitinových ocelí, protože vznik oxidického síťoví ohraňujícího zrna, není příliš závislý na chemickém složení.



Obr. 36 Oxidační metoda[28]

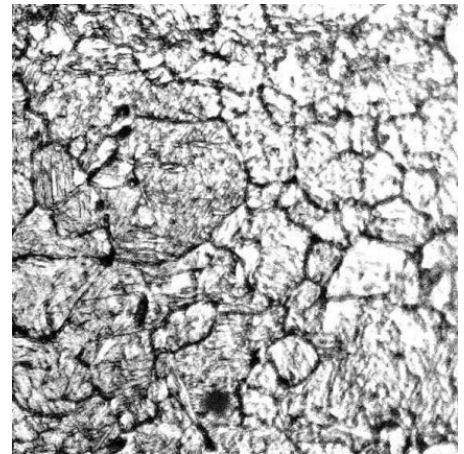
Metoda nauhličování podle McQuaida-Ehna - je založena na difúzi uhlíku a je určena pro cementační nebo nízkouhlíkové oceli. Nauhličování probíhá při teplotě cca 925°C po dobu 8 hodin, včetně předehřevu. Tak vznikne obvykle nauhličená vrstva o tloušťce asi 1 mm. Aby



Obr. 37 Metoda nauhličování [29]

bylo zajištěno vyloučení cementitu po hranicích zrn nauhličené vrstvy (obr. 37), musí být ochlazování vzorku dostatečně pomalé. Pro zvýraznění hranic zrn se vzorek rozřízne kolmo k nauhličenému povrchu a pro zvýraznění se použije jedno z následujících činidel: 2g kyseliny pikrové + 25 g hydroxidu sodného + voda (nejméně 1 min při 100 °C ponořením, nebo 60 s elektrolyticky při 6 V ve stejnosměrném proudu při 20 °C) nebo 2 – 5 ml kyseliny dusičné + etanol (doplní se do 100 ml). [31]

Metoda leptání podle Becheta-Beaujarda se používá pro zvýraznění austenitických zrn tepelně zpracovaného vzorku s martenzitickou nebo bainitickou strukturou (obr. 38). Pro úspěšné použití této metody musí být obsah fosforu minimálně 0,005 %. Pokud není vzorek tepelně zpracován, je nutné tak učinit podle předepsaného postupu tepelného zpracování pro daný výrobek stanoveného normou. V případě, že nejsou podmínky tepelného zpracování stanoveny, musí být vzorek (z konstrukční uhlíkové nebo nízkolegované oceli) tepelně zpracován podle následujících podmínek: pro oceli s méně než 0,35 % C – 1,5 h při (880 ± 10) °C a pro oceli s více než 0,35 % C – 1,5 h při (850 ± 10) °C. Pro vyvolání hranic austenitických zrn je nutné vzorek vyleštit a naleptat vodním roztokem nasyceným kyselinou pikrovou s nejméně 0,5 % alkylsulfoátu sodného nebo jiného smáčecího činidla. Doba leptání se může pohybovat od několika minut až po desítky minut. Pro zlepšení kontrastu je v některých případech nutné několikrát opakovat operaci leštění a leptání. U prokalitelných ocelí je možné po kalení vzorek popustit. [31]



Obr. 38 Metoda leptání [30]

Vyjádření velikosti austenitického zrna

Pro stanovení velikosti austenitického zrna existuje mnoho metod. Metody se od sebe liší nejen principem, ale také způsobem vyjádření velikosti zrna (vyjádření číslem x vyjádření počtem zachycených úseků zrn nebo počtem protnutých hranic zrn přímkou nebo kružnicí x vyjádření plochou zrna). Obecně lze tyto metody rozdělit na metody porovnávací a početní.

Pro svoji jednoduchost a postačující přesnost jsou **porovnávací metody** v praxi velice často používané. Tyto metody jsou založené na porovnávání velikosti austenitického zrna viditelná v zorném poli okuláru mikroskopu nebo na matnici se sériemi normovaných zobrazení velikosti zrn nebo s fóliemi příkládanými na toto zobrazení. Porovnávání se provádí obvykle při stonásobném zvětšení. Jako porovnávací stupnice lze použít např. stupnici podle americké normy ASTM E112-10 nebo podle ruské normy GOST 5639-82. [31]

Stupnice podle **ASTM E112-10** je rozdělena na 30 stupňů (00, 0, 0.5, 1.0, 1.5...14.0). Čím je stupeň menší, tím větší je austenitické zrno. Velikost zrna se značí písmenem G. Pro každý stupeň je zde také uveden počet zrn na jednotku plochy, střední plocha zrna, střední průměr zrna apod. [32]

Porovnávací stupnice podle **GOST 5639-82** je rozdělena na deset stupňů. Stejně jako u ASTM E112 jsou u každého stupně vyjádřeny parametry zrna. Pokud jsou pozorovaná austenitická zrna větší nebo menší než tyto stupně a nelze je zařadit do této stupnice, je možné místo zvětšení 100x použít zvětšení jiné (větší i menší). V tomto případě se skutečná velikost vyhodnocuje podle tabulky 18. Stávajících deset stupňů je rozšířeno o dalších osm. V případě, že jsou na vzorku zrna rozdílných velikostí, je možné výslednou zrnitost zapsat dvěma čísli – první značí velikost převažujících zrn, druhé zrna menšinová. K druhému číslu je také možné napsat zaujímanou plochu menšinových zrn v procentech. [33]

Zvětšení	Velikost zrn																	
100x	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Zvětšení jiné než 100x																		
25x	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	-	-	
50x	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	-	-	-	-	
200x	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	-	
400x	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
800x	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	2	3	4	5	6	7	

Tab. 18 Přepočítávání velikosti austenitického zrna při různém zvětšení podle GOST 5639-82 [33]

Počtní metody jsou oproti porovnávacím metodám pracnější, avšak dosahují přesnějších výsledků. Níže jsou uvedeny vybrané dva způsoby výpočtu velikosti zrna.

Princip **planimetrické metody** spočívá v namalování nebo přiložení kružnice o průměru 79,8 mm na mikrofotografii nebo na obraz na matnici. Zvětšení se zvolí tak, aby kruhová plocha obsahovala minimálně 50 zrn (obr. 39).

Stanoví se počet zrn ležících celou svojí plochou kruhové ploše (n_1) a počet zrn kružnicí protnutých (n_2). Celkový počet rovnocenných zrn se vypočítá:

$$n_{100} = n_1 + \frac{n_2}{2}$$

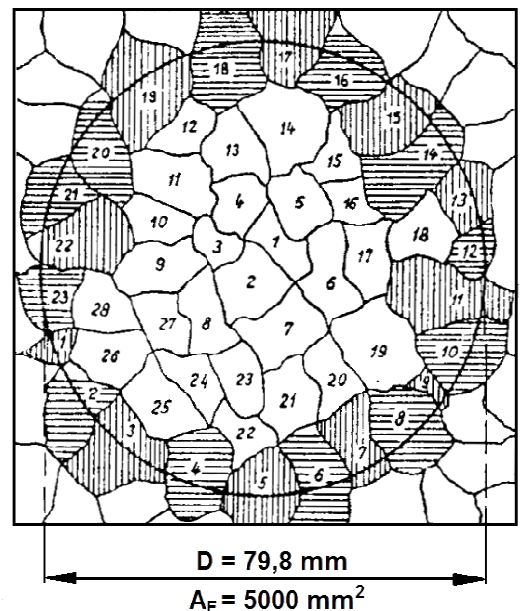
Počet zrn \underline{m} na mm^2 povrchu vzorku se vypočítá:

$$m = 2 \cdot n_{100}$$

V případě libovolného zvětšení g je výpočet:

$$m = (g^2/5000) \cdot n_1,$$

kde 5000 je kruhová plocha v mm^2 .



Obr. 39 Planimetrická metoda [31]

Systematická chyba plynoucí z předpokladu, že polovina protnutých zrn leží uvnitř kružnice a polovina mimo ní, vzrůstá se zmenšujícím se počtem zrn uvnitř zkušební kružnice. Při počtu 50 zrn uvnitř kružnice je systematická chyby cca 2 %. Této chybě se lze vyhnout využitím čtverce nebo obdélníku místo kružnice, bez ohledu na počet zrn uvnitř zkušební obrazce. Tento postup předpokládá, že v rozích čtverce nebo obdélníku jsou čtyři čtvrtinové plochy zrna, což by odpovídalo jednomu celému zrnu, to se však zanedbává. Stejně jako u předcházející metody se stanoví počet zrn n_1 a n_2 . Výpočet je pak následující:

Počet zrn \underline{m} na mm^2 povrchu vzorku je:

$$m = (g^2/A_F) \cdot n_{100}$$

kde A_F je zdánlivá plocha zkušební obrazce (čtverce nebo obdélníku) v mm^2 . Vypočtené hodnotě \underline{m} je možné podle ASTM 112-10, ČSN EN ISO 643 nebo GOST 5639-82 přiřadit hodnotu velikosti zrna G. [31]

Metodou podle Minstra se velikost austenitického zrna spočítá ze vztahu:

$$d = \frac{D \cdot k}{n}$$

kde \underline{d} je střední průměr zrn v mm, \underline{D} je skutečný průměr kružnice v mm, \underline{n} je počet protnutých zrn kružnicí a \underline{k} je konstanta rovná 4.

Za předpokladu kruhových zrn se střední plocha zrna vypočte:

$$f = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$$

Metoda podle Minstra je jednoduchá a dosahuje přesných výsledků.

Jak již bylo uvedeno, pro praktické využití plně postačuje využití porovnávacích metod, protože význam velikosti austenitického zrna je vzhledem k vlastnostem strojních součástí do určité míry omezený. [26]

6.4.3 Řádkovitost

Řádkovitost je způsobena především nehomogenitou chemického složení a přítomností vměstků v litém polotovaru. Během tváření pak dochází k přemísťování vměstků do řádek ve směru osy válcování nebo kování, přičemž tvárné vměstky se v tomto směru deformují (protahují). U podeutektoidních ocelí se okolo těchto vměstků vylučuje podeutektoidní ferit. Tím vznikají řádky feritu a vytváří feriticko-perlitickou řádkovitou strukturu. [34][26]

Řádkovitost je možné posuzovat např. podle ruské normy GOST 5640-68, české normy ČSN 42 0469 nebo americké normy ASTM E1268-01.

Podle ruské normy **GOST 5640-68** se řádkovitost posuzuje porovnáním pozorované struktury s etalony při stonásobném zvětšení. Hodnocená ocel je podle obsahu uhlíku rozdělena do tří tzv. řad následujícím způsobem: do 0,15 % C – řada A, od 0,16 do 0,30 % C – B, od 0,31 do 0,50 % C – V. Každá řada je pak podle rozsahu řádkovitosti rozdělena do šesti stupňů od 0 do 5. Každé řadě s odpovídajícím stupněm náleží krátký popis, který řádkovitost slovně popisuje.

Hodnocení řádkovitosti podle české normy **ČSN 42 0469** je téměř totožné s hodnocením podle normy ruské. Rozdíl je však v rozdělení ocelí do etalonových řad podle

obsahu uhlíku a v označení řad: do 0,10 % C – 2A, od 0,10 do 0,25 % C – 2B, od 0,25 do 0,50 % - 2C. Dalším rozdílem je slovní hodnocení. Slovně je řádkovitost hodnocena pouze podle stupňů (všem třem řadám odpovídají stejné popisky). [35]

6.5 Výsledky hodnocení

6.5.1 Mikročistota

Mikročistota byla hodnocena podle normy ČSN ISO 4967 metodou B, tzn., že byl zkoušený celý vyleštěný povrch vzorku a každé hodnocené pole bylo srovnáváno s normovanými zobrazeními. Na každém vzorku bylo hodnoceno celkem 15 polí. Každému poli bylo na základě normovaných zobrazení pro jednotlivý typ vměstku přiřazeno odpovídající indexové číslo vyjadřující stupeň znečištění. Pro jeden typ vměstku se indexové číslo zaznamenává zvlášť pro jemné a hrubé vměstky (série), podle šířky (resp. průměru) vměstků. U každého typu vměstku a pro každou sérii byly vypočítány celkové a průměrné indexy i_{celk} a $i_{\text{stř}}$. Celkový index se vypočítá sečtením všech indexů každého hodnoceného pole pro každý typ vměstku a sérii. Průměrný index se vypočítá vydělením celkového indexu počtem sérií. V tabulce 19 jsou uvedeny zjištěné hodnoty $i_{\text{stř}}$ pro vměstky typu A (sulfidický typ) a D (typ globulárních oxidů); ostatní druhy vměstků nebyly na vzorcích pozorovány.

Vzorek	Vměstky typu A		Vměstky typu D	
	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé
W11-1	0,067	-	0,467	-
W11-2	-	-	0,333	-
W11-6	-	-	0,567	-
W11-7	-	-	0,467	0,133
W11-10	0,400	0,167	0,433	0,100
W11-12	-	-	0,900	0,067
W11-14	-	-	0,933	0,067
W11-19	0,067	-	0,467	0,067
W11-24	-	-	0,633	-
W11-27	-	-	1,100	-
W11-28	0,033	0,033	0,200	-
W12-31	0,167	0,100	1,333	0,100
W12-33	-	-	0,500	0,233
W12-34	0,600	-	0,933	-
W12-36	0,367	-	1,200	-
W12-37	1,100	0,033	0,767	0,067
W12-40	-	-	0,567	0,033
W12-41	-	-	0,600	0,100
W12-42	-	-	0,333	-

Tab. 19 Mikročistota podle ČSN ISO 4967

V tabulce 23 (viz. příloha č. 3) je uveden příklad stanovení mikročistoty pro vzorek W11-10.

6.5.2 Velikost austenitického zrna

Pro vyvolání austenitického zrna byla použita oxidační metoda. Vzorky s vyleštěným povrchem byly zahřány v peci bez ochranné atmosféry na austenitizační teplotu (cca 880°C) s výdrží 1,5 hodiny. Následovalo ochlazení do vody. Na vzorcích se provedl šikmý výbrus jemným brusným papírem (zrnitost 1200) a leštění diamantovou pastou s velikostí zrna 3 μm. Samotné vyjádření velikosti austenitického zrna se provádělo pomocí světelného mikroskopu Axio Observer Z1m a softwaru AxioVision, vyhodnocujícího velikost zrna podle normy ČSN EN ISO 643. Na každém vzorku byly hodnoceny tři pole, průměrné hodnoty měření jsou uvedeny v tabulce 20.

Vzorek	W11-1	W11-2	W11-6	W11-7	W11-10	W11-12	W11-14	W11-19	W11-24
Velikost zrna	9	9	8	8	7	9	8,5	8	9
W11-27	W11-28	W12-31	W12-33	W12-34	W12-36	W12-37	W12-40	W12-41	W12-42
9	9	7,5	8	7,5	8,5	8,5	8,5	9	9

Tab. 20 Velikost austenitického zrna podle ČSN EN ISO 643

6.5.3 Řádkovitost a mikrostruktura

Po provedení metalografického výbrusu (broušení, leštění) byly vzorky naleptány v 3% Nitalu (3% roztok HNO₃ v etanolu) po dobu cca 5 vteřin.

Řádkovitost feritu a perlitu byla hodnocena podle české normy ČSN 42 0469. Hodnotil se nejvyšší stupeň řádkovitosti, zjištěný nejméně na třech místech celého naleptaného povrchu vzorku. Pozorované struktury byly srovnávány s etalonovou řadou 2B (pro ocel s 0,10 až 0,25 % C) a pomocí stupnice od 0. do 5. stupně řádkovitosti (Tab. 24 – viz. příloha č. 4). Jako přípustná hodnota řádkovitosti byl zvolen stupeň 3; Stupeň 4 a 5 byl posuzován jako nevyhovující.

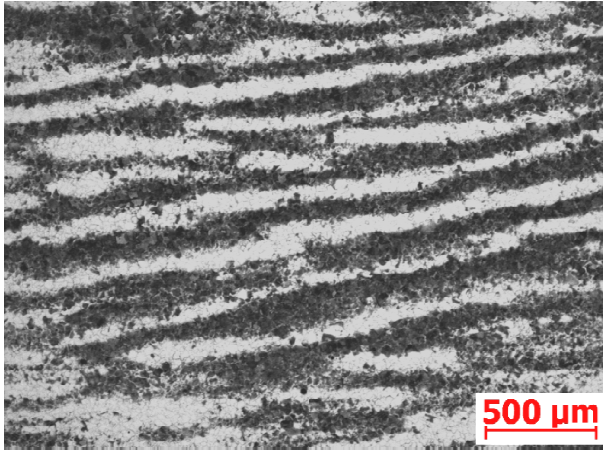
Hodnocení řádkovitosti a mikrostruktury bylo prováděno pomocí světelného mikroskopu Axio Observer Z1m a softwaru AxioVision.

Na následujících obrázcích 40 až 77 jsou uvedeny fotografie struktur všech devatenácti vzorků při zvětšení 25x, 200x a 500x. U každého vzorku je uveden vyhodnocený stupeň řádkovitosti a stručný popis struktury.

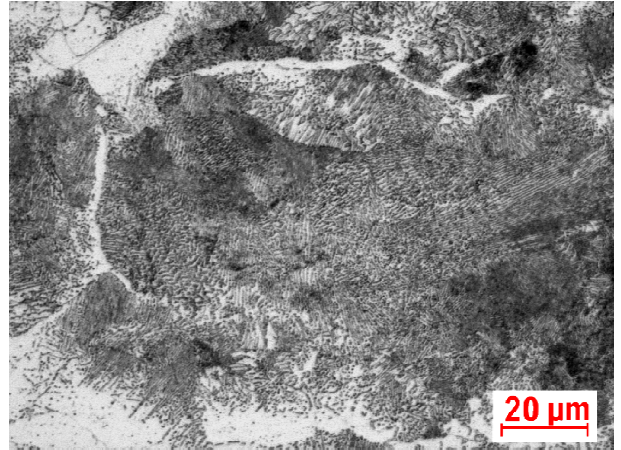
Vzorek W11-1

Řádkovitost: 4

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 40 Vzorek W11-1, řádkovitost, zvětšení 25x

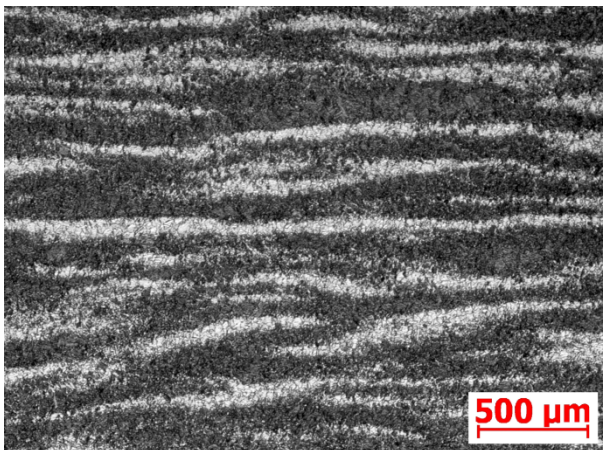


Obr. 41 Vzorek W11-1, zvětšení 500x

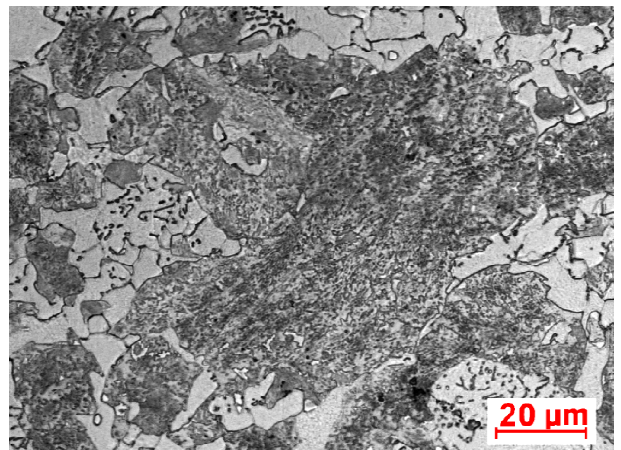
Vzorek W11-2

Řádkovitost: 2

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s velice jemným lamelárním perlitem a místy se vyskytujícím poměrně hrubým globulárním perlitem; patrná feriticko-perlitická řádkovitost



Obr. 42 Vzorek W11-2, řádkovitost, zvětšení 25x

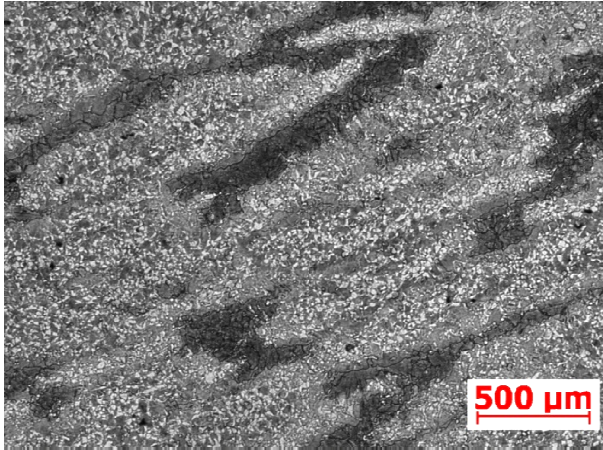


Obr. 43 Vzorek W11-2, zvětšení 500x

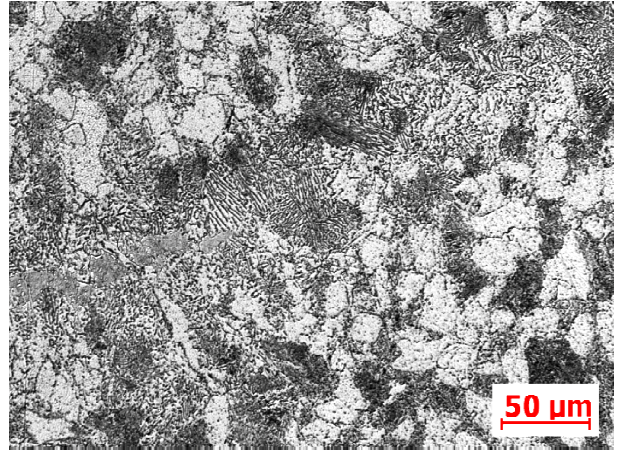
Vzorek W11-6

Řádkovitost: 1

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s lamelárním a globulárním perlitem; ferit se vyskytuje v nepravidelných podlouhlých oblastech.



Obr. 44 Vzorek W11-6, řádkovitost, zvětšení 25x

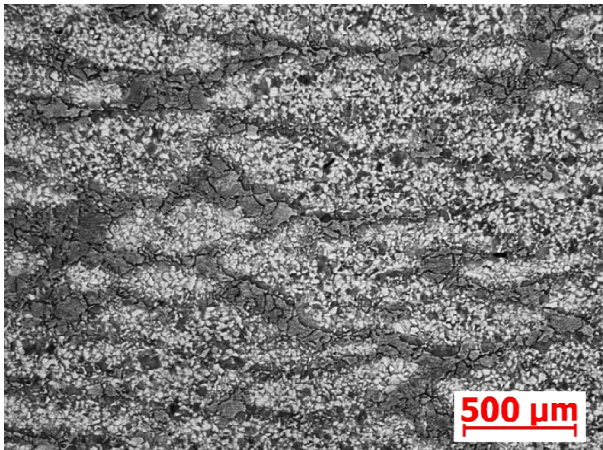


Obr. 45 Vzorek W11-6, zvětšení 200x

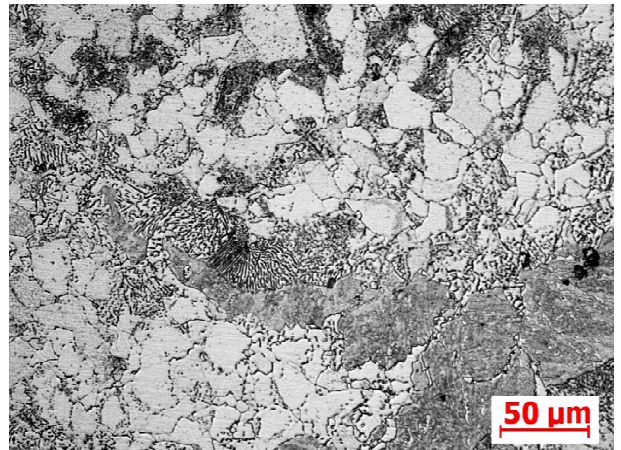
Vzorek W11-7

Řádkovitost: 1

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s lamelárním a globulárním perlitem; ferit se vyskytuje v různě velkých podlouhlých ostrůvcích.



Obr. 46 Vzorek W11-7, řádkovitost, zvětšení 25x

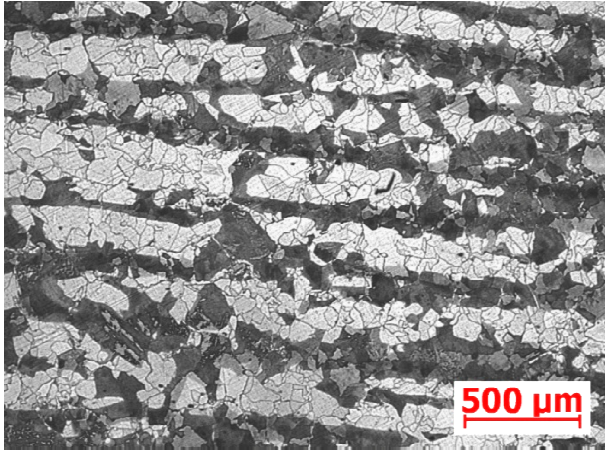


Obr. 47 Vzorek W11-7, zvětšení 200x

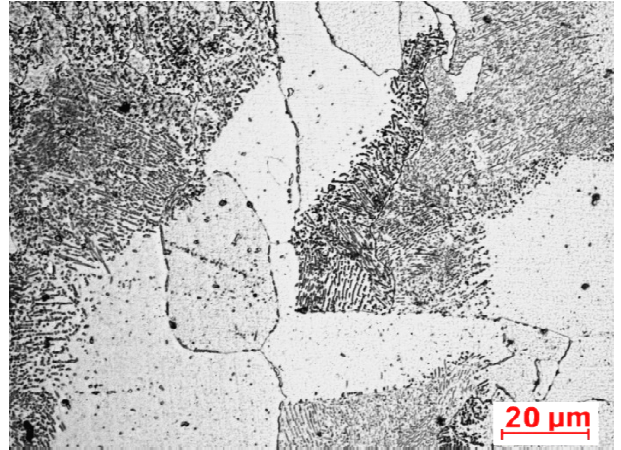
Vzorek W11-10

Řádkovitost: 4

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s lamelárním a globulárním perlitem a širokými oblastmi feritu; výrazná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 48 Vzorek W11-10, řádkovitost, zvětšení 25x

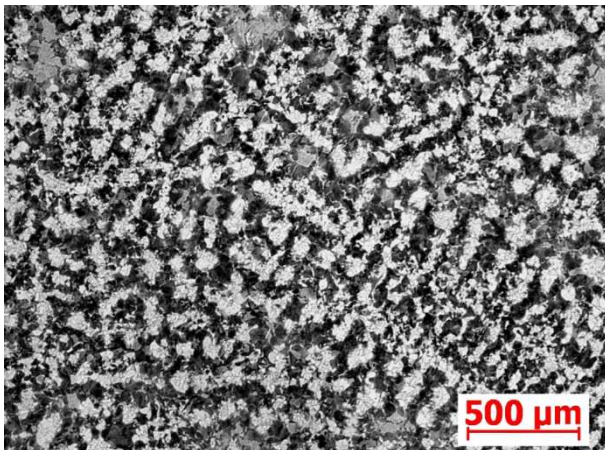


Obr. 49 Vzorek W11-10, zvětšení 500x

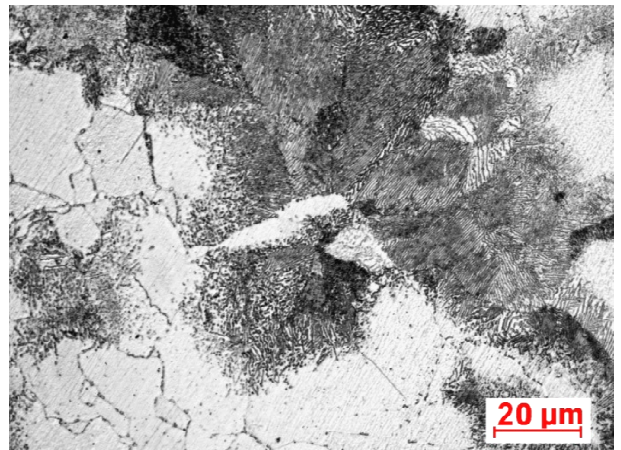
Vzorek W11-12

Řádkovitost: 0

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s převážně jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; patrná lící struktura



Obr. 50 Vzorek W11-12, řádkovitost, zvětšení 25x

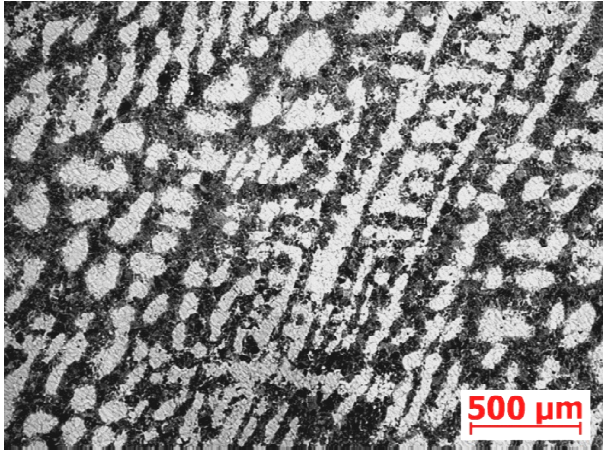


Obr. 51 Vzorek W11-12, zvětšení 500x

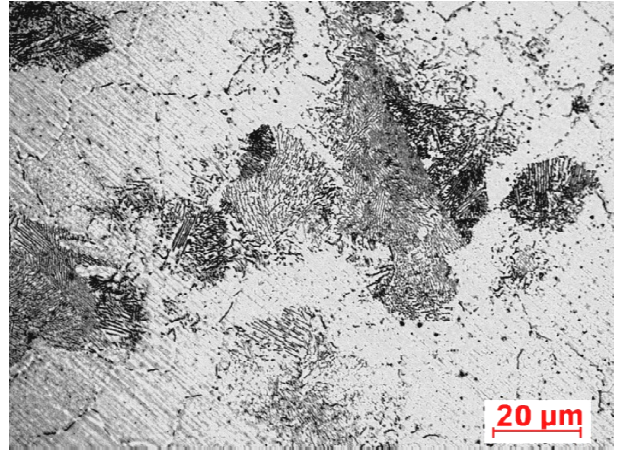
Vzorek W11-14

Řádkovitost: 0

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; patrná licí struktura



Obr. 52 Vzorek W11-14, řádkovitost, zvětšení 25x

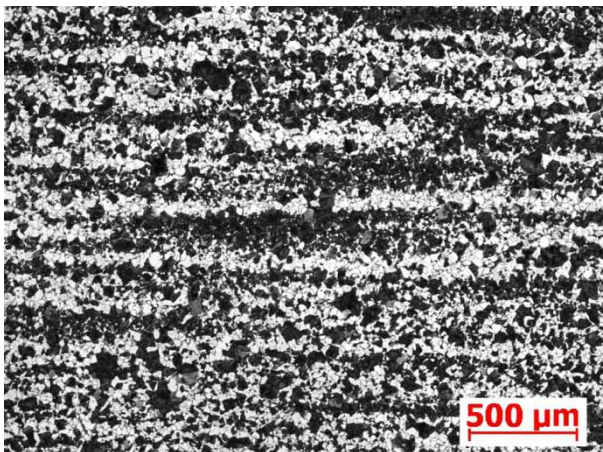


Obr. 53 Vzorek W11-14, zvětšení 500x

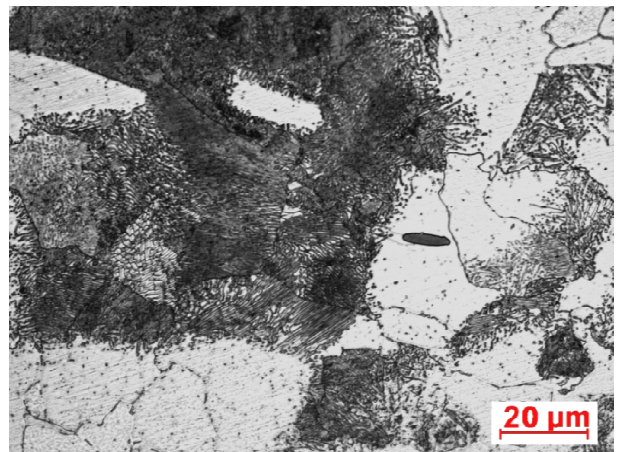
Vzorek W11-19

Řádkovitost: 3

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s jemným lamelárním perlitem; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 54 Vzorek W11-19, řádkovitost, zvětšení 25x

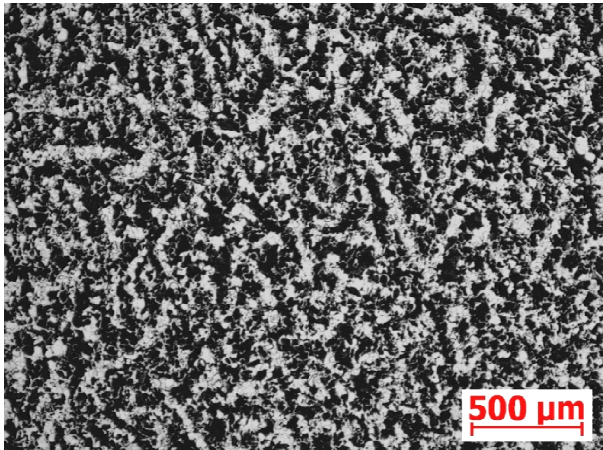


Obr. 55 Vzorek W11-19, zvětšení 500x

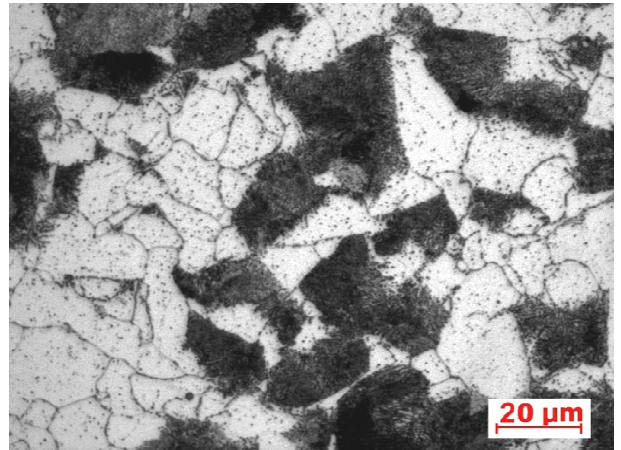
Vzorek W11-24

Řádkovitost: 0

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s jemným lamelárním perlitem; pravidelné rozložení feritu a perlitu



Obr. 56 Vzorek W11-24, řádkovitost, zvětšení 25x

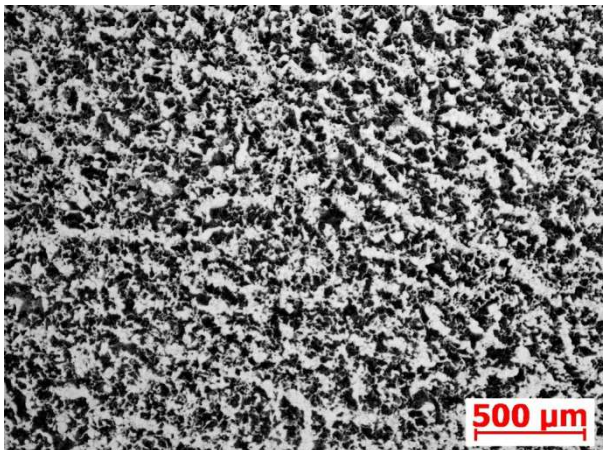


Obr. 57 Vzorek W11-24, zvětšení 500x

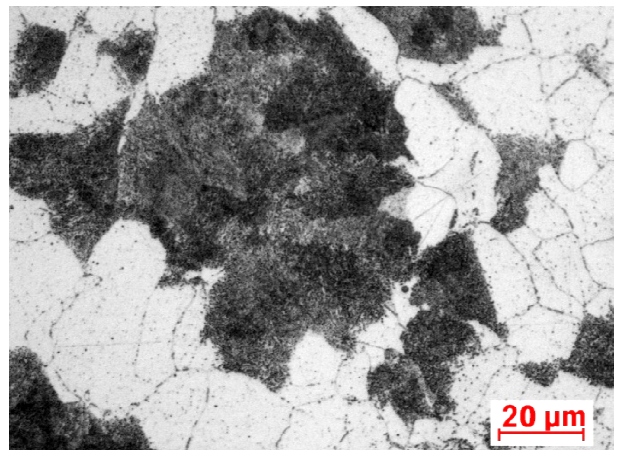
Vzorek W11-27

Řádkovitost: 0

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s jemným lamelárním perlitem; pravidelné rozložení feritu a perlitu



Obr. 58 Vzorek W11-27, řádkovitost, zvětšení 25x

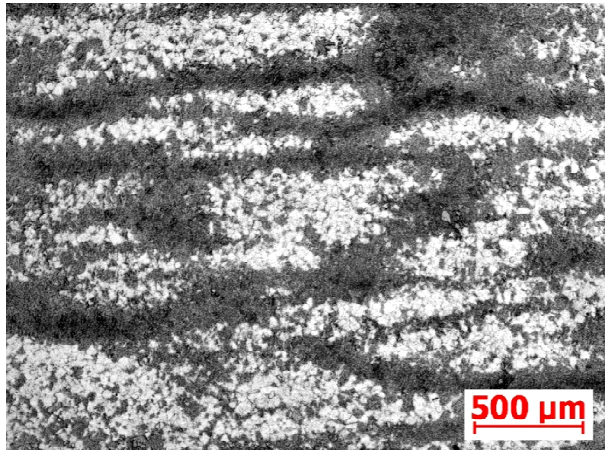


Obr. 59 Vzorek W11-27, zvětšení 500x

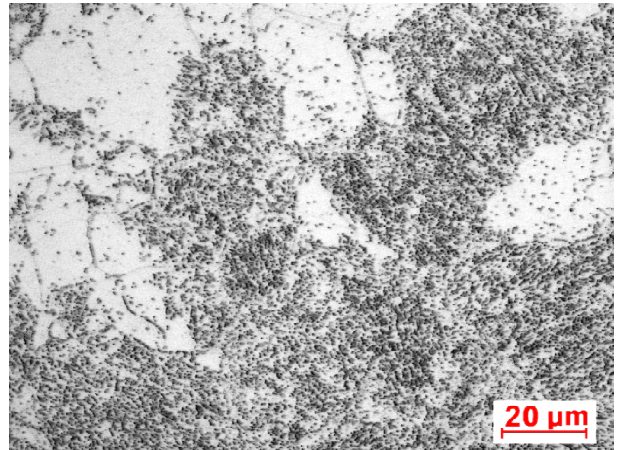
Vzorek W11-28

Řádkovitost: 2

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s globulárním perlitem; feritická struktura se vyskytuje v různě velkých podlouhlých ostrůvcích



Obr. 60 Vzorek W11-28, řádkovitost, zvětšení 25x

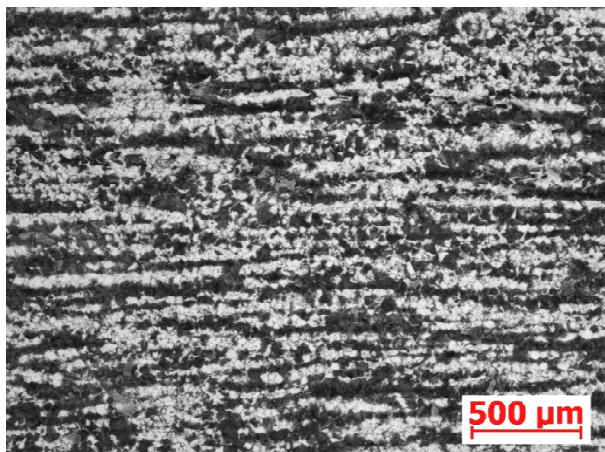


Obr. 61 Vzorek W11-28, zvětšení 500x

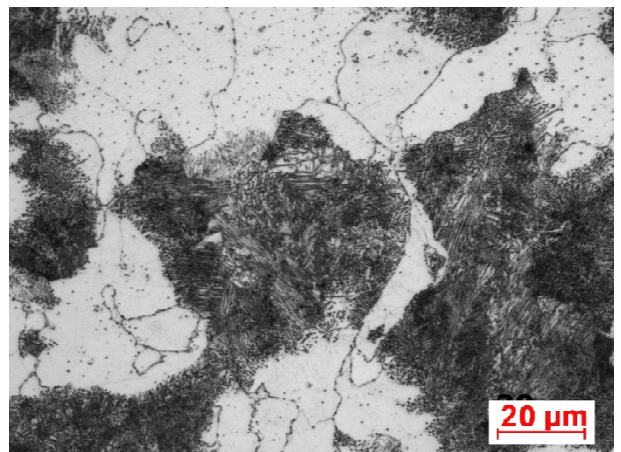
Vzorek W12-31

Řádkovitost: 3

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s jemným lamelárním perlitem; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 62 Vzorek W12-31, řádkovitost, zvětšení 25x

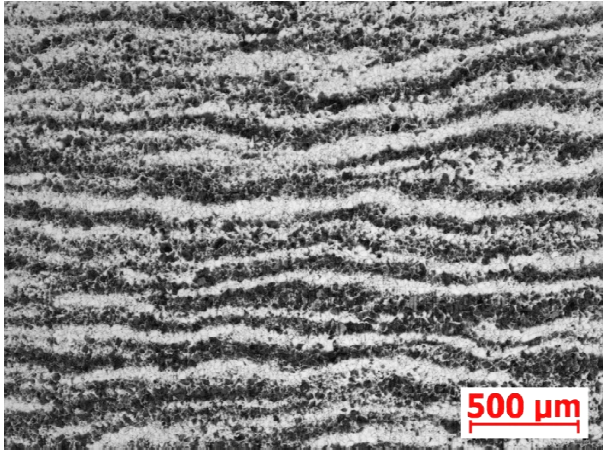


Obr. 63 Vzorek W12-31, zvětšení 500x

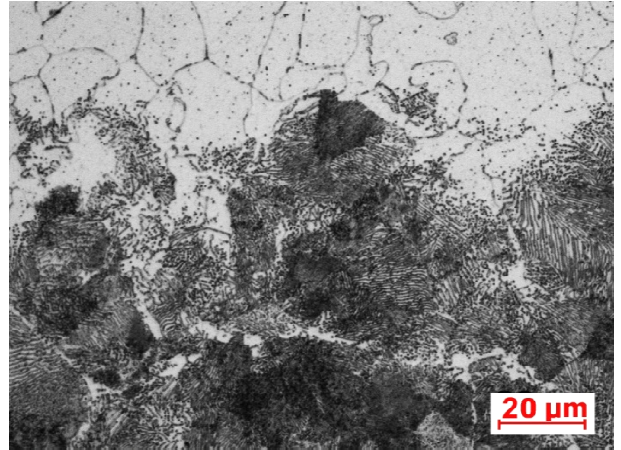
Vzorek W12-33

Řádkovitost: 5

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 64 Vzorek W12-33, řádkovitost, zvětšení 25x

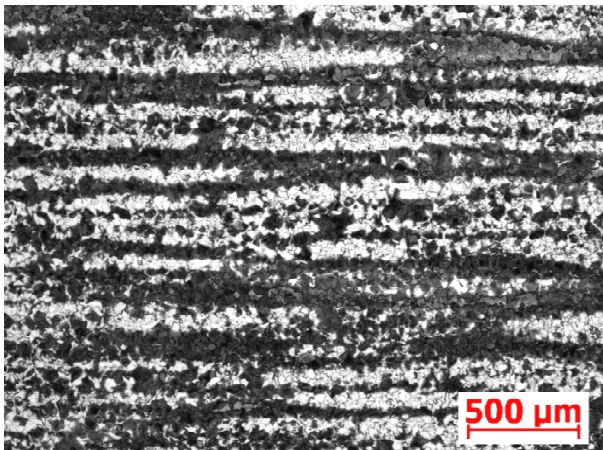


Obr. 65 Vzorek W12-33, zvětšení 500x

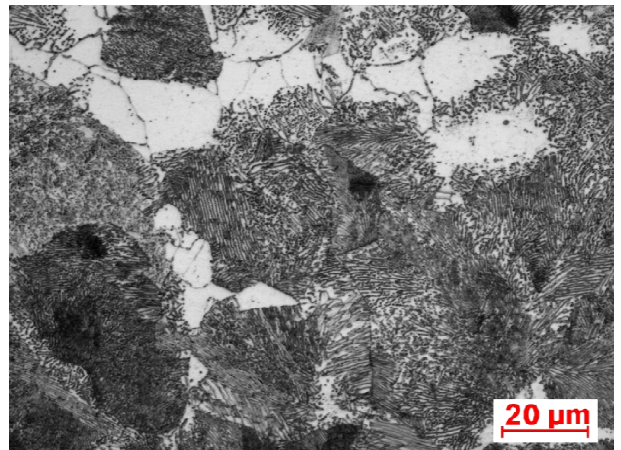
Vzorek W12-34

Řádkovitost: 3

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 66 Vzorek W12-34, řádkovitost, zvětšení 25x

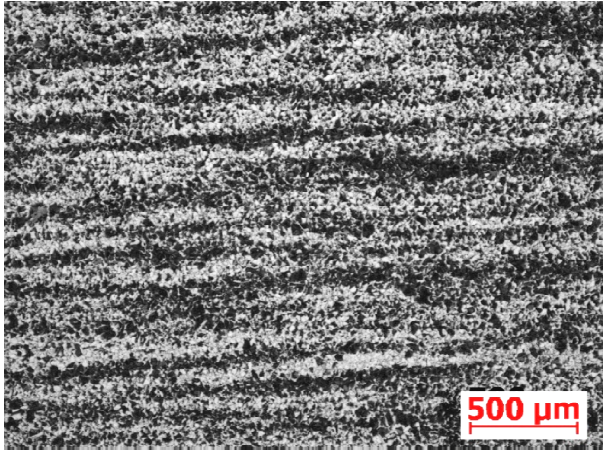


Obr. 67 Vzorek W12-34, zvětšení 500x

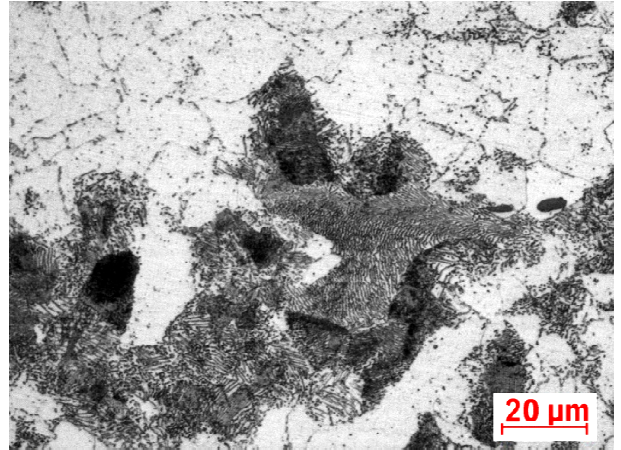
Vzorek W12-36

Řádkovitost: 4

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 68 Vzorek W12-36, řádkovitost, zvětšení 25x

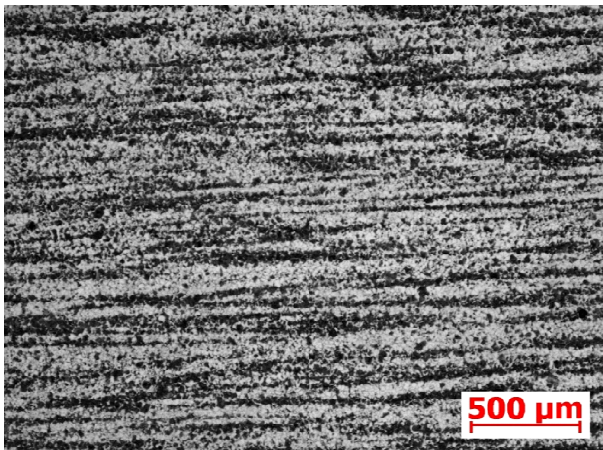


Obr. 69 Vzorek W12-36, zvětšení 500x

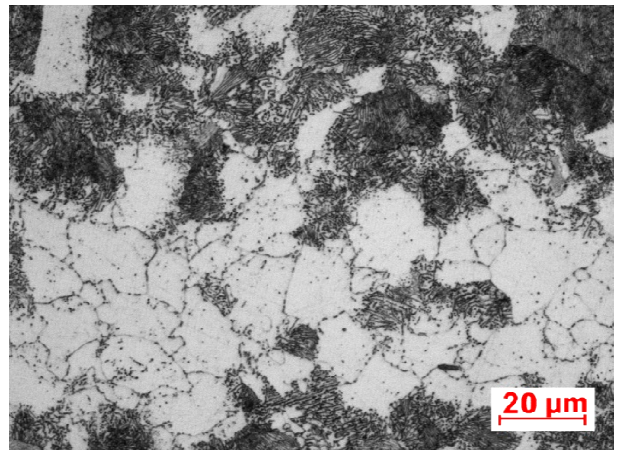
Vzorek W12-37

Řádkovitost: 3

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; značná řádkovitost feritu a perlitu



Obr. 70 Vzorek W12-37, řádkovitost, zvětšení 25x

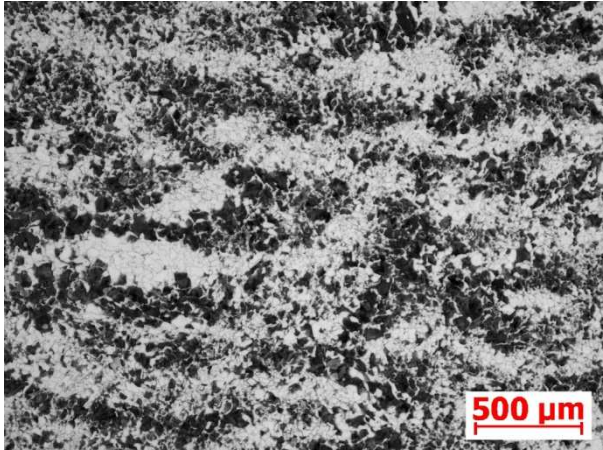


Obr. 71 Vzorek W12-37, zvětšení 500x

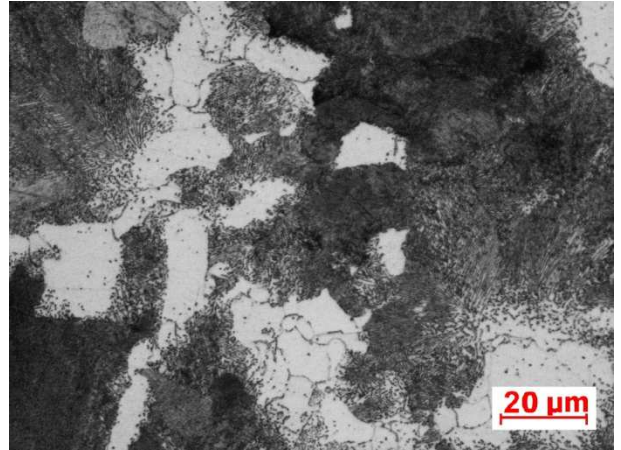
Vzorek W12-40

Řádkovitost: 1

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; ferit se vyskytuje v nepravidelných podlouhlých oblastech



Obr. 72 Vzorek W12-40, řádkovitost, zvětšení 25x

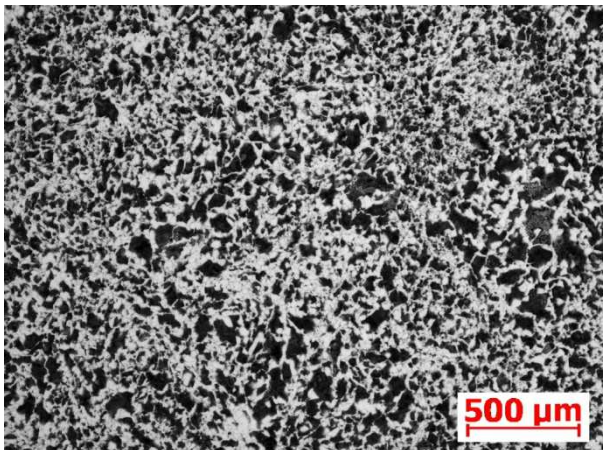


Obr. 73 Vzorek W12-40, zvětšení 500x

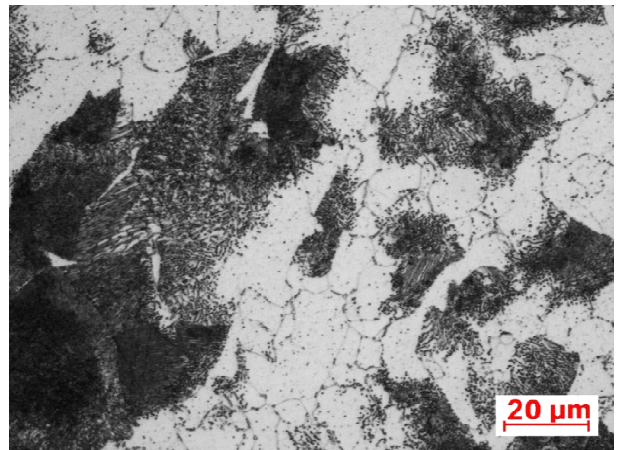
Vzorek W12-41

Řádkovitost: 0

Mikrostruktura: feriticko-perlitická převážně s jemným lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; pravidelné rozložení feritu a perlitu



Obr. 74 Vzorek W12-41, řádkovitost, zvětšení 25x

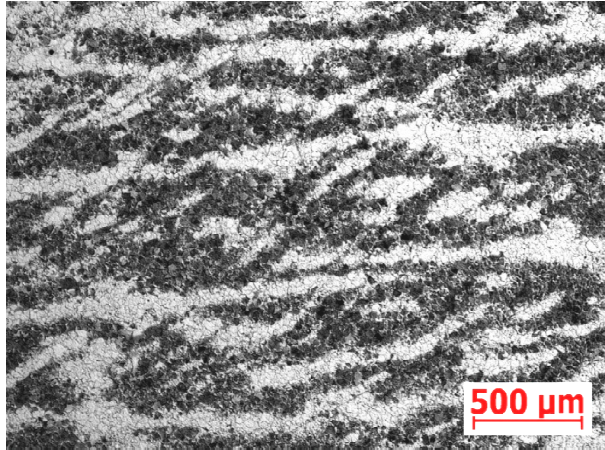


Obr. 75 Vzorek W12-41, zvětšení 500x

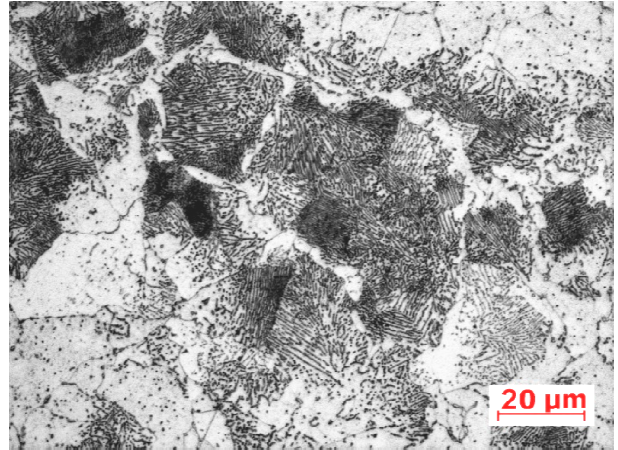
Vzorek W12-42

Řádkovitost: 1

Mikrostruktura: feriticko-perlitická s převážně lamelárním perlitem a malým podílem globulárního perlitu; patrná lící struktura



Obr. 76 Vzorek W12-42, řádkovitost, zvětšení 25x



Obr. 77 Vzorek W12-42, zvětšení 500x

6.5.4 Tvrdość HV₁₀

Pro měření tvrdosti bylo použito měření se zatížením 98,07 N, tj. HV₁₀. Na každém vzorku bylo změřeno pět hodnot. Pro měření byl použit tvrdoměr 432 SVD (Reicherter Wolpert). Změřené hodnoty jsou uvedeny v tabulce 21.

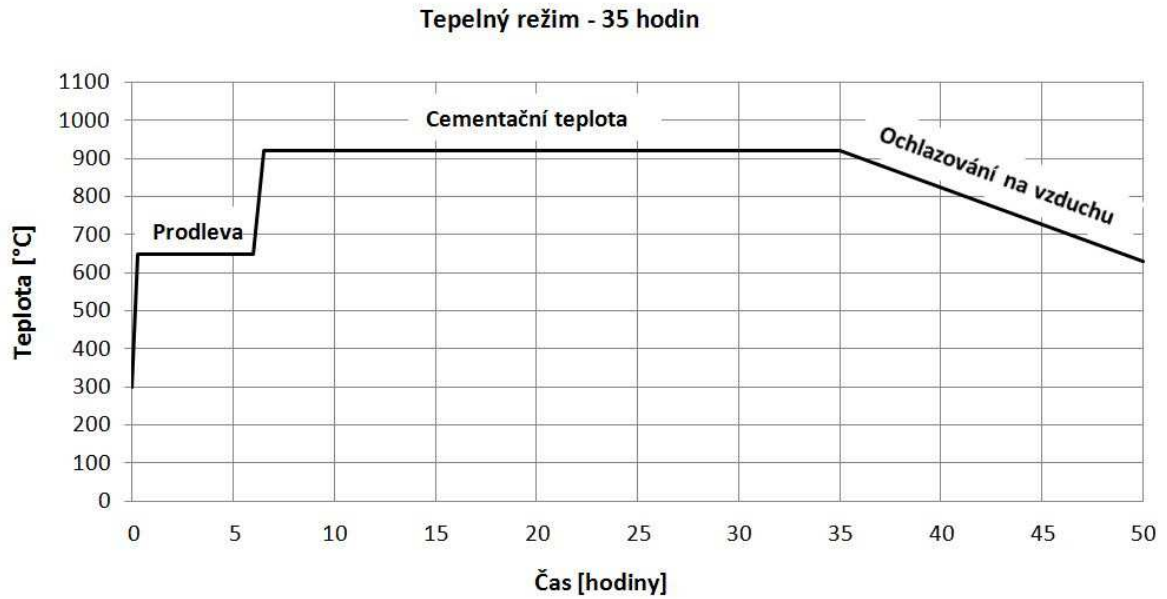
Vzorek	W11-1	W11-2	W11-6	W11-7	W11-10	W11-12	W11-14	W11-19	W11-24
HV ₁₀	148±1,0	200±2,1	170±2,4	171±5,2	161±3,6	169±6,9	164±5,5	173±2,9	167±1,5
W11-27	W11-28	W12-31	W12-33	W12-34	W12-36	W12-37	W12-40	W12-41	W12-42
173±3,5	165±2,1	167±6,6	168±4,8	150±3,8	166±2,0	167±4,2	158±3,5	150±2,6	152±1,3

Tab. 21 Tvrdość HV₁₀

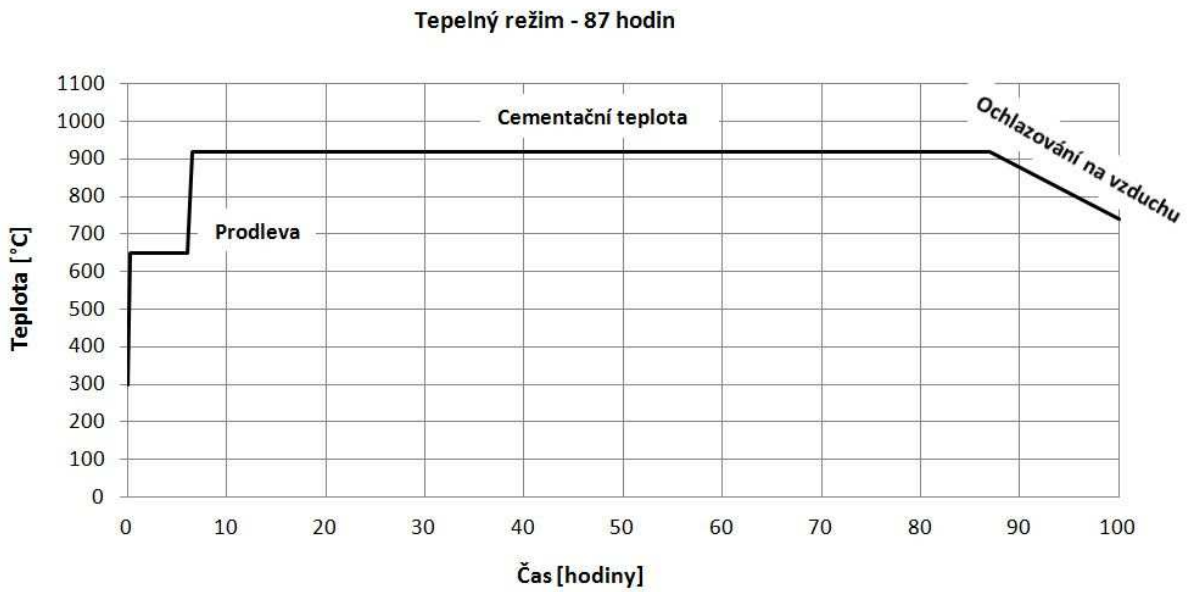
7 Vliv chemicko-tepelného zpracování na výslednou strukturu

Dalším cílem experimentální části práce bylo posoudit vliv cementování na výslednou strukturu polotovaru z oceli 18CrNiMo7-6. Experimentem mělo být zjištěno, jaký vliv má cyklus cementace na změnu řádkovitosti feritu a perlitu. Tepelné zpracování bylo navrženo na základě reálných parametrů cementace, používaných při cementování ozubených kol.

Pro uvedený experiment byly zvoleny dva způsoby tepelného režimu, aby bylo možné posoudit vliv doby cementování na změnu řádkovitosti. První režim trval 35 hodin (obr. 78), druhý 87 hodin (obr. 79). Po tepelném zpracování byl na vzorcích proveden metalografický výbrus ve stejném směru jako před tepelným zpracováním, aby bylo možné struktury porovnat.



Obr. 78 Tepelný režim experimentu – 35 hodin

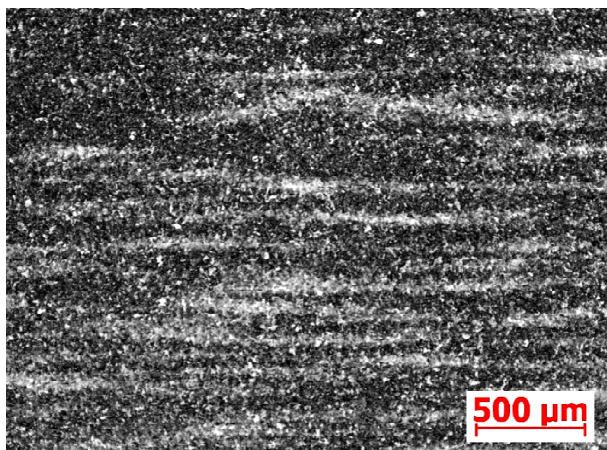


Obr. 79 Tepelný režim experimentu – 87 hodin

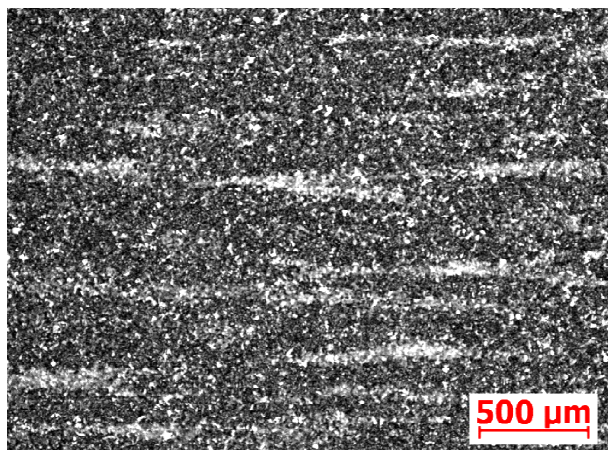
Pro tepelné zpracování trvající 35 hodin byly zvoleny vzorky W12-37 (řádkovitost 3), W12-36 (řádkovitost 4) a W12-33 (řádkovitost 5). Pro tepelné zpracování trvající 87 hodin byly zvoleny vzorky W11-7 (řádkovitost 1), W11-2 (řádkovitost 2) a W11-1 (řádkovitost 4).

Tepelné zpracování - 35 hodin:

Před TZ (řádkovitost 3)

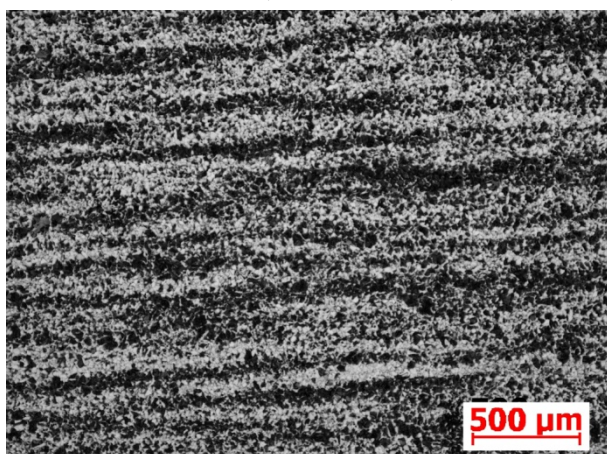


Po TZ

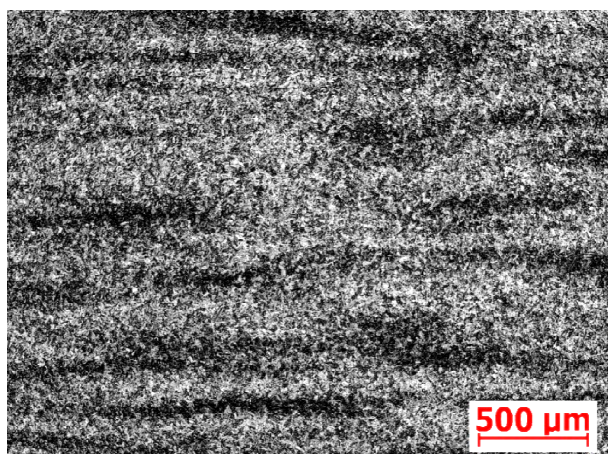


Obr. 80 Vzorek W12-37 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

Před TZ (řádkovitost 4)

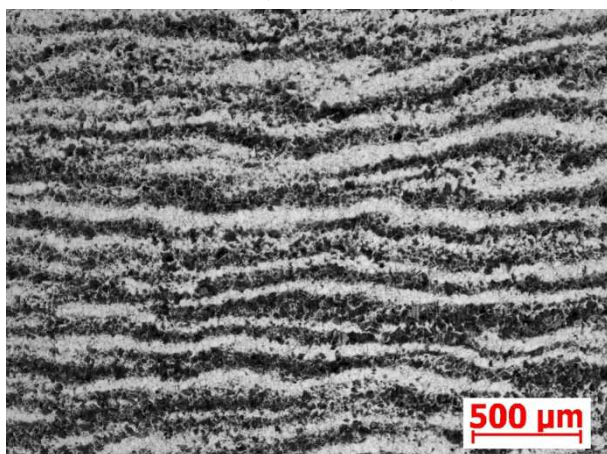


Po TZ

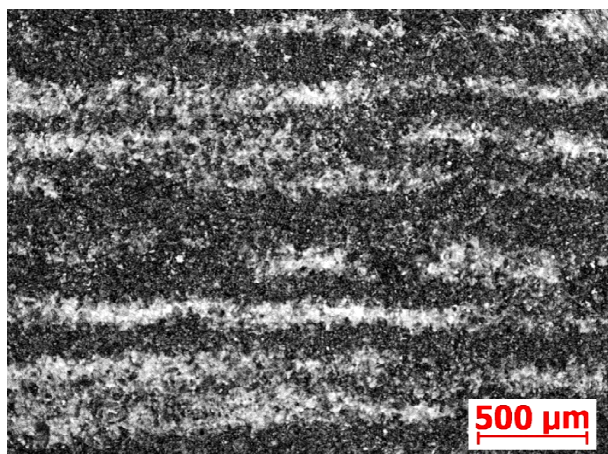


Obr. 81 Vzorek W12-36 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

Před TZ (řádkovitost 5)



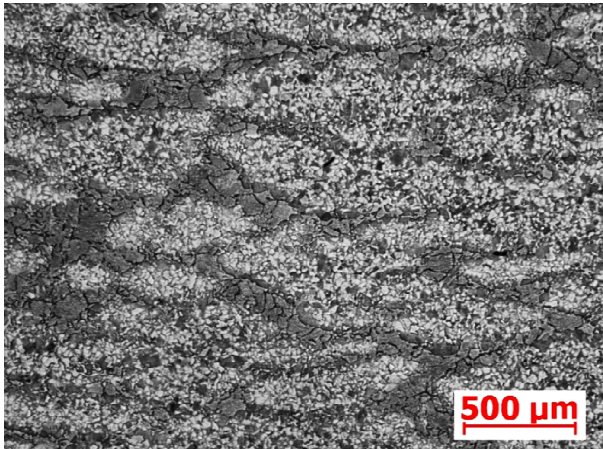
Po TZ



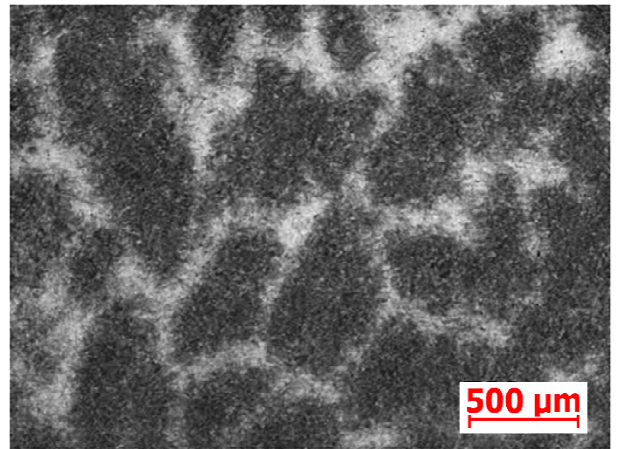
Obr. 82 Vzorek W12-33 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

Tepelné zpracování - 87 hodin:

Před TZ (řádkovitost 1)

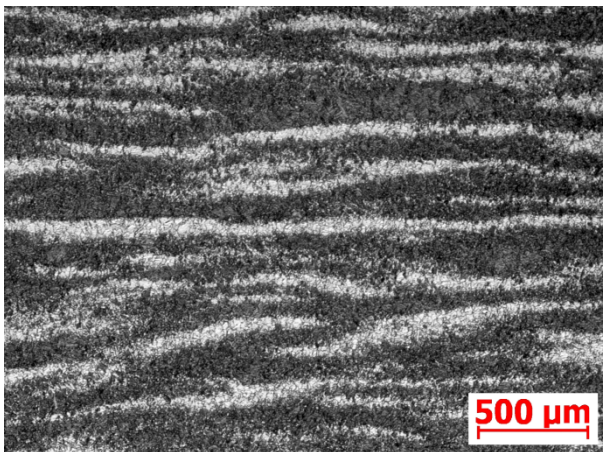


Po TZ

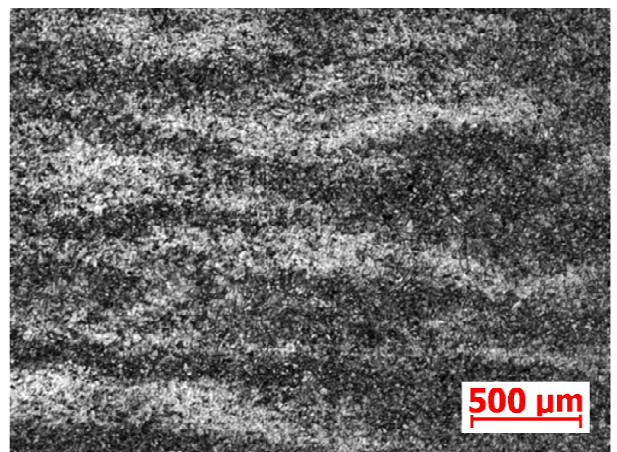


Obr. 83 Vzorek W11-7 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

Před TZ (řádkovitost 2)

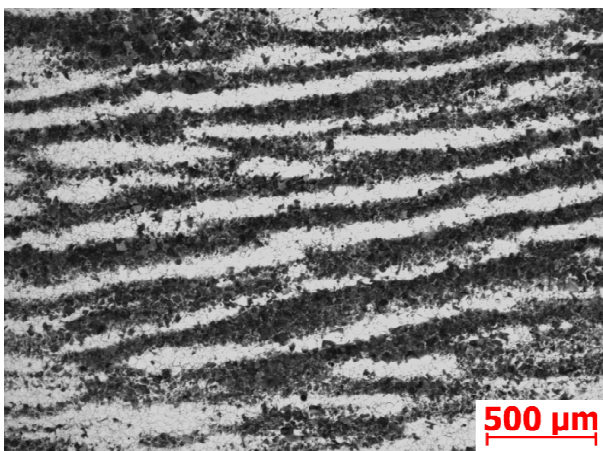


Po TZ

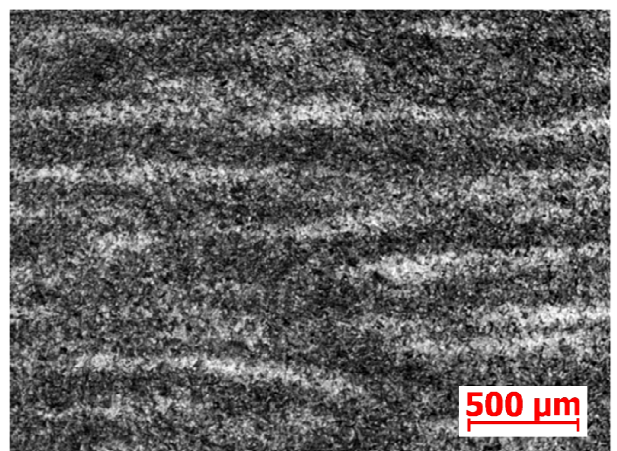


Obr. 84 Vzorek W11-2 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

Před TZ (řádkovitost 4)



Po TZ



Obr. 85 Vzorek W11-1 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x

8 Diskuze výsledků

Vzorky byly dodávány v různých velikostech a u některých nebylo možné přesně identifikovat, z jakého místa a směru vzhledem k polotovaru byly odebrány. Tyto skutečnosti mohou do určité míry ovlivňovat výsledky hodnocení.

8.1 Mikročistota

Jak již bylo zmíněno, stupeň znečištění nekovovými vměstkami podstatně ovlivňuje jakost a užité vlastnosti oceli. V případě ozubených kol, kde jsou kladeny vysoké nároky na ozubení, by snížení houževnatosti, odolnosti proti pittingu nebo únavových vlastností, mohlo vést během provozu až k porušení ozubených kol nebo dokonce celého soustrojí. Z tohoto důvodu je nutné udržovat množství vměstků pod určitou stanovenou hranicí. [26]

Povolené množství vměstků pro cementační oceli ozubených kol s nejvyšším stupněm kvality (ME) podle normy ČSN ISO 6336-5 je uvedeno v tabulce 23. V této práci však byla hodnota mikročistoty posuzována podle vnitropodnikové normy společnosti, která vyrábí ozubená kola, a která poskytla vzorky pro tuto práci. Maximální přípustné množství jednotlivých vměstků podle této normy je uvedeno v tabulce 8.

Žádný z hodnocených vzorků nepřekročil maximální přípustnou hodnotu mikročistoty (tab. 19). Nejvyšší hodnoty pro jemné vměstky typu A dosáhl vzorek W12-37 (1,100), ostatní hodnoty byly podstatně nižší nebo nulové. Hodnoty hrubých vměstků typu A byly z převážné většiny nulové nebo dosahovaly velmi nízkých hodnot. Vměstky typu B a C nebyly pozorovány. Jemné vměstky typu D byly pozorovány na všech hodnocených vzorcích. Hodnoty se pohybovaly od 0,200 do 1,200. Výrazně vyšších hodnot dosahovalo těchto šest vzorků: W11-12 (0,900), W11-14 (0,933), W11-27 (1,100), W12-31 (1,333), W12-34 (0,933) a W12-36 (1,200). Hodnoty hrubých vměstků typu D byly velmi nízké nebo nulové.

8.2 Velikost austenitického zrna

Dalším faktorem, který ovlivňuje výsledné vlastnosti oceli je velikost austenitického zrna. Se snižující se velikostí austenitického zrna roste vrubová houževnatost, únavové vlastnosti a ocel má menší sklon ke vzniku trhlin po kalení. Protože jsou tyto vlastnosti pro cementovaná ozubená kola zvláště důležité, je nutné, aby se velikost austenitického zrna pohybovala v určitých mezích. [26]

Podle normy ČSN ISO 6336-5 je požadavek na velikost zrna 5 a jemnější (podle ISO 643). V této práci byla velikost austenitického zrna posuzována podle vnitropodnikové normy, která požaduje velikost zrna 6 a jemnější.

Všechny hodnocené vzorky splňovaly požadavek vnitropodnikové normy (tab. 20). Nejnižší hodnota velikosti austenitického zrna 7,5 byla naměřena na vzorcích W12-31 a W12-34. Na zbylých vzorcích se velikost zrna pohybovala mezi hodnotou 8 a 9.

8.3 Řádkovitost

Řádkovitost feritu a perlitu způsobuje anizotropii mechanických vlastností. V případě, že by v místě polotovaru, kde bude později vyhotoveno ozubení, byla značná řádkovitost, mohlo by vlivem snížení mechanických vlastností dojít k porušení ozubeného kola nebo celého soustrojí. Řádkovitost by se proto měla pohybovat pod určitou stanovenou hranicí.

Stupeň řádkovitosti byl posuzován podle normy ČSN 42 0469 (tab. 24). Jako přípustná hodnota řádkovitosti byl zvolen stupeň 3. Stupně 4 a 5 byly posuzovány jako nevyhovující.

Z celkových devatenácti vzorků byly čtyři vzorky posouzeny jako nevyhovující (kapitola 6. 4. 3). U vzorků W11-1, W11-10 a W12-36 byla zjištěna řádkovitost stupně 4 a u vzorku W12-31 řádkovitost stupně 5. U vzorků W11-12, W11-14, W11-24, W11-27 a W12-41 byla řádkovitost nulová. U vzorků W11-6, W11-7, W12-40 a W12-42 byla hodnota řádkovitosti 1. Řádkovitost stupně 2 vykazovaly vzorky W11-2 a W11-28. Vzorky W11-19, W12-31, W12-34 a W12-37 měly řádkovitost stupně 3.

Řádkovitost ovlivňuje mnoho faktorů, které je nutné brát v úvahu během celého procesu výroby polotovaru. Řádkovitost ovlivňuje množství a druh vměstků, které závisí na způsobu výroby oceli již ve slévárně. Při tuhnutí slitin dochází k dendritické a pásmové segregaci způsobující značnou nehomogenitu v tuhém stavu. Při dendritické segregaci roste krystalizační zárodek nejprve ve směru os budoucích dendritů, prostor mezi osami tuhne později. Protože se z taveniny nejprve vylučují krystalické fáze chudé na příměsi, je jejich obsah v osách dendritů nižší než průměrná hodnota slitiny. Mezi osami dendritů je naopak obsah příměsí vyšší. Pásmová segregace vzniká vlivem vad ingotů vznikajících při tuhnutí, které jsou důsledkem vylučování plynů z taveniny, jejich pohybu a také tepelným pnutím. Pásmová segregace bývá většího rozsahu než segregace dendritická. K segregaci jsou náchylné nejen kovové prvky, ale zejména nečistoty. Stupeň segregace je závislý na obsahu jednotlivých prvků, způsobu tavení, způsobu lití a tepelném zpracování. Vzhledem k velkému sklonu k segregaci a nepříznivému vlivu na vlastnosti ocelí se sleduje především segregace síry a fosforu. [26]

Dalšími faktory ovlivňujícími řádkovitost jsou stupeň protváření (čím větší stupeň protváření, tím jsou menší vzdálenosti mezi řádky), dokovací teplota, velikost austenitického zrna, teplota austenitizace nebo rychlost ochlazování po tváření, které souvisí s technologickým procesem v kovárně. [36]

8.4 Mikrostruktura

Všechny hodnocené vzorky mají feriticko-perlitickou strukturu lišící se pouze morfologií perlitu a rozložením a velikostí jednotlivých fází (kapitola 6. 4. 3). Vzorky W11-19, W11-24, W11-27 a W12-31 mají strukturu tvořenou pouze feritem a lamelárním perlitem. Struktura vzorku W11-28 je tvořena feritem a globulárním perlitem. Vzorek W11-2 má strukturu tvořenou feritem, velice jemným lamelárním perlitem a určitým množstvím poměrně hrubého globulárního perlitu. Ostatní vzorky mají strukturu tvořenou feritem, lamelárním perlitem a určitým množstvím jemného globulárního perlitu.

Při menším zvětšení bylo možné pozorovat rozložení jednotlivých fází v celé ploše vzorku. Vzorky W11-6, W11-7, W11-28 a W12-40 mají strukturu tvořenou nepravidelnými podlouhlými oblastmi (ostrůvky) feritu a perlitem. Na struktuře vzorků W11-12, W11-14 a W12-42 je patrná původní licí struktura, což poukazuje na nedostatečné protváření polotovarů. Na obrázku 88 (viz. příloha č. 5) je zub vyříznutý z ozubeného kola vyrobeného ze stejného polotovaru jako vzorek W12-42. Na zubu jsou jasně viditelné dendrity. Vzorky W11-24, W11-27 a W12-41 mají strukturu rovnoměrně rozmístěného feritu a perlitu v celé hodnocené ploše. Struktura vzorku W11-10 je tvořena širokými pásy feritu, které dosahují šířky až 0,3 mm, což může mít značný vliv na mechanické vlastnosti oceli. Ostatní vzorky vykazovaly řádkovitou strukturu s různým počtem a rozmístěním řádků, viz předchozí kapitola.

8.5 Tvrdość HV₁₀

Měření tvrdości patří k základnímu zkoušení mechanických vlastností materiálů. V případě této práce bylo zvoleno pro ověření základních požadavků polotovarů (FP stav). Převážná většina změřených hodnoty tvrdości HV₁₀ (tab. 21) se pohybovala v rozmezí hodnot pro dodávaný stav oceli 18CrNiMo7-6 (164 až 220 HV₁₀). U pěti vzorků byla změřena hodnota tvrdości HV₁₀ pod spodní hranici tohoto rozmezí. Tvrdość byla měřena pro ověření dodaného stavu, podstatnější výsledky však poskytuje studium mikrostruktury.

8.6 Vliv chemicko-tepelného zpracování na výslednou strukturu

Po provedení tepelného zpracování simulujícího tepelný průběh při cementování bylo zjištěno, že během tepelného zpracování dojde vlivem difúze k rozšíření rádků feritu a tím k mírnému snížení heterogenity struktury (kapitola 7). Ve výsledné struktuře je však stále patrná původní rádkovitost, z čehož vyplývá, že ani po celém procesu cementace nedojde k výraznější změně původní feriticko-perlitické rádkovité struktury. Podstatnější rozdíl ve změně rádkovitosti mezi tepelným zpracováním trvajícím 35 hodin a tepelným zpracováním trvajícím 87 hodin nebyl pozorován.

Z uvedeného vyplývá, že by struktura polotovarů pro cementovaná ozubená kola neměla přesahovat zvolený maximální stupeň rádkovitosti 3.

9 Návrh úpravy dodacích podmínek polotovarů

Na základě výsledků této diplomové práce byly navrženy úpravy dodacích podmínek polotovarů pro cementovaná ozubená kola z oceli 18CrNiMo7-6.

Polotovary nakupovat pouze ve feriticko-perlitickém stavu

Stupeň rádkovitosti by měl být posuzován pouze u oceli ve feriticko-perlitickém stavu. Po zušlechťení již rádkovitost nemusí být patrná, i přes stále přetrvávající nehomogenitu struktury, která může během tepelného zpracování způsobovat potíže.

Pokud bude firma vyrábějící cementovaná ozubená kola provádět zušlechťování na polotovarech v dodaném feriticko-perlitickém stavu, bude možné zajistit stejné podmínky tepelného zpracování a tím bude možné dosáhnout stejné výchozí struktury oceli před samotným chemicko-tepelným zpracováním.

Požadovat přesný postup kování a případné tepelné zpracování v průběhu kování

V některých atestech polotovarů, z nichž byly vzorky vyhotoveny, chyběla informace o stupni prokování. Tato informace však ještě nevyovídá o průběhu tváření. Nevhodným postupem tváření může dojít k nedostatečnému protváření celého polotovaru nebo vzniku nadměrné rádkovitosti struktury. Z těchto důvodů by v postupu kování měly být informace o kovacím zařízení, zakreslené tvary polotovaru v průběhu jednotlivých tvářecích operací, výpočet stupně prokování a teploty ohřevu a výdrže v jednotlivých tvářecích operacích.

Požadovat záznamy o tepelném zpracování

Důležitou informací je způsob a průběh veškerého tepelného zpracování před dodáním polotovaru. Záznamy o tepelném zpracování by proto měly obsahovat průběh teplot během celého tepelného zpracování (rychlost ohřevu, doba výdrže, rychlost ochlazování), velikost vsázky, ochlazovací prostředí a typ pece.

Zařadit do dodacích podmínek požadavek na maximální přípustný stupeň řádkovitost feriticko-perlitické struktury

Do dodacích podmínek zařadit maximální přípustný stupeň řádkovitosti 3. Hodnocení provádět podle normy ČSN 42 0469.

Požadovat dostatečné rozměry vzorků s nákresem a označením směru odkud byl vzorek vzhledem k polotovaru pořízen

Pro hodnocení kvality vzorků (mikročistota, řádkovitost, velikost austenitického zrna, mikrostruktura) by měl být minimální rozměr vzorku 20x20x10 mm. Nezbytným údajem je orientace vzorku vzhledem k polotovaru. Poloha vzorku by měla být vyobrazena nejlépe nákresem s jednoznačným označením směrů.

Závěr

Pro hodnocení kvality polotovarů z oceli 18CrNiMo7-6 byly na základě platných norem zvoleny tyto posuzované vlastnosti: mikročistota, velikost austenitického zrna, řádkovitost feritu a perlitu, mikrostruktura a tvrdost HV₁₀. Další částí experimentu bylo posouzení vlivu cementování na výslednou strukturu oceli, zejména vliv na snížení řádkovitosti feritu a perlitu.

Zjištěné hodnoty mikročistoty u žádného hodnoceného vzorku nepřekračovaly maximální povolené hodnoty stanovené normou společnosti. Stav nekovových vměstků je proto z tohoto hlediska vyhovující.

Měřením velikosti austenitického zrna bylo zjištěno, že všechny hodnocené vzorky vykazovaly austenitické zrno jemnější, než je požadavek normy společnosti. Velikost austenitického zrna byla proto posouzena jako vyhovující.

Pro hodnocení řádkovitosti feritu a perlitu byla stanovena nejvyšší přípustná hodnota řádkovitosti stupněm 3. Z devatenácti hodnocených vzorků dosahovaly tři vzorky (W11-1, W11-10 a W12-36) řádkovitost stupně 4 a jeden stupně 5 (W12-31). Tyto čtyři vzorky byly z hlediska řádkovitosti posouzeny jako nevyhovující.

Při metalografickém hodnocení struktur byly následující vzorky posouzeny jako nevyhovující: Vzorky W11-6, W11-7, W11-28 a W12-40 vykazovaly nerovnoměrné rozložení feritu a perlitu, kde byl ferit uspořádán do podlouhlých nepravidelných oblastí. Na vzorcích W11-12, W11-14 a W12-42 byla patrná licí struktura, poukazující na nedostatečné protváření oceli. Struktura vzorku W11-10 byla tvořena pásy feritu o šířce až 0,3 mm.

U dodávaného materiálu byla ověřena tvrdost.

Experimentem bylo prokázáno, že ani po celém režimu cementace nedojde k výrazné změně řádkovitosti feritu a perlitu. Z tohoto důvodu je nutné aby řádkovitost dodávaných polotovarů nepřekračovala stupeň řádkovitosti 3.

Použité zdroje:

1. **Cetkovský, S, Frantál, B a Štekl, J.** *Větrná energie v České republice: Hodnocení prostorových vztahů, environmentálních aspektů a socioekonomických souvislostí.* místo neznámé : Ústav geoniky Akademie věd ČR, 2010. str. 208.
2. www.csve.cz. *Česká společnost pro větrnou energii.* [Online] [Citace: 7. 12 2011.] www.csve.cz.
3. www.gwec.net. *Global Wind Energy Council.* [Online] 2010. [Citace: 5. 12 2011.] http://www.gwec.net/fileadmin/images/Publications/GWEC_annual_market_update_2010_-_2nd_edition_April_2011.pdf.
4. www.csas.cz. *Česká spořitelna.* [Online] 30. 9 2011. [Citace: 7. 12 2011.] <http://www.csas.cz/banka/content/inet/internet/cs/CEZ.pdf>.
5. issar.cenia.cz. *Informační systém statistiky a reportingu.* [Online] [Citace: 12. 15 2011.] <http://issar.cenia.cz/issar/page.php?id=1560>.
6. www.mywindpowersystem.com. *My Wind Power System: Powering The World.* [Online] [Citace: 28. 12 2011.] <http://www.mywindpowersystem.com/2011/10/the-10-major-wind-power-companies-in-the-world>.
7. **Hosnedl, S a Krátký, J.** *Příručka strojního inženýra 2: Převodové mechanismy.* místo neznámé : Computer Press, 2000. str. 198.
8. www.vutbr.cz. *Vysoké učení technické v Brně.* [Online] [Citace: 28. 12 2011.] http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=16901.
9. www.keywordpictures.com. *KeywordPictures.* [Online] [Citace: 5. 1 2012.] <http://www.keywordpictures.com/abuse/enercon%20e%2048///>.
10. gedrivetrain.com. *GE Drivetrain Technologies.* [Online] [Citace: 7. 1 2012.] http://gedrivetrain.com/assets/PDFs/GE_DrivetrainTechnologies_Gearboxes_broch.pdf.
11. **Davis, J. R.** *Gear Materials, Properties, and Manufacture.* místo neznámé : ASM International, 2005. str. 339.
12. **Rankhit, A. K.** *Heat Treatment of Gears: A practical Guide for Engineers.* místo neznámé : ASM International, 2000. str. 212.
13. **Kraus, Václav.** *Tepelné zpracování a slinování.* Plzeň : ZČU Plzeň, 2000. str. 274.
14. www.bolzano.cz. *Bohdan Bolzano.* [Online] [Citace: 10. 1 2012.] www.bolzano.cz.
15. **Ryš, P., a další.** *Nauka o materiálu I: Nauka o kovech.* Praha : ACADEMIA, 1975. str. 544. Sv. 4. svazek.
16. **Martínková, J.** old.fst.zcu.cz. [Online] 2008. [Citace: 15. 1 2012.] [http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST\(SVOC\)/_2008/_sbornik/PapersPdf/](http://old.fst.zcu.cz/_files_web_FST/_SP_FST(SVOC)/_2008/_sbornik/PapersPdf/).
17. **Davis, J. R.** *Surface Hardening of Steels.* místo neznámé : ASM International, 2003. str. 364.
18. **Dostálová, M.** *Bakalářská práce - Vliv povrchového chemicko-tepelného zpracování na otěruvzdornost ocelí.* Plzeň : autor neznámý, 2011. str. 59.
19. www.ecosond.cz. *Ecosond.* [Online] [Citace: 3. 2 2012.] www.ecosond.cz/kyslikove-sondy-ecosond.html.

- 20. Chandler, H.** *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels*. Second Edition. místo neznámé : ASM International, 1995. str. 904.
- 21. Parrish, G.** *Carburizing: Microstructures and Properties*. místo neznámé : ASM International, 1999. str. 300.
- 22. Totten, G., Howes, M. a Inoue, T.** *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. místo neznámé : ASM International, 2001. str. 550.
- 23. ASM Handbook: volume 4: Heat Treating**. místo neznámé : ASM International, 1991. str. 1012.
- 24. Šťastný, P.** *Bakalářská práce - Vliv polohy vzorku na roštu z heldiska deformací při tepelném zpracování*. Liberec : Technická univerzita v Liberci, 2001. str. 48.
- 25. BN EN 10084.** *Case hardening steels: Technical delivery conditions*. místo neznámé : BSI, 2008. str. 40.
- 26. Koutský, J. a Šmíd, J.** *Makroskopické a mikroskopické zkoušení ocelí*. místo neznámé : SNTL, 1964. str. 126.
- 27. ČSN ISO 4967.** *Ocel - Stanovení obsahu nekovových vměstků - Mikrografická metoda využívající normovaná zobrazení*. místo neznámé : Český normalizační institut, 2003. str. 40.
- 28. Imai, Y. a Hirotsani, H.** ir.library.tohoku.ac.jp. [Online] 12. 9 1957. [Citace: 3. 2 2012.] <http://ir.library.tohoku.ac.jp/re/bitstream/10097/26848/1/KJ00004196184.pdf>.
- 29. McPherson, O.** www.wpi.edu. [Online] 30. 4 2008. [Citace: 3. 2 2012.] http://www.wpi.edu/Pubs/E-project/Available/E-project-042508-223025/unrestricted/MQP_Grain_Growth.pdf.
- 30.** www.georgevandervoort.com. [Online] [Citace: 3. 2 2012.] http://www.georgevandervoort.com/met_papers/IronandSteel/Etching_PAGBS_IH_2010.pdf.
- 31. ČSN EN ISO 643.** *Ocel - Mikrografické stanovení velikosti zrn*. místo neznámé : Český normalizační institut, 2003. str. 40.
- 32. ASTM E112-10.** *Standard Test Methods for Determining Average Grain Size*. místo neznámé : ASTM International, 2010. str. 26.
- 33. GOST 5639-82.** *Steel and alloys: Methods for detection and determination of grain size*. 1983. str. 39.
- 34.** www.345.vsb.cz. [Online] [Citace: 16. 2 2012.] <http://www.345.vsb.cz/jirihruby/Texty/11Anizotrop.pdf>.
- 35. ČSN 42 0469.** *Metalografické hodnocení ocelových plechů a pásů*. Praha : Vydavatelství úřadu pro normalizaci a měření, 1978. str. 28.
- 36. Vašek, V., a další.** www.metal2012.com. [Online] 22. 5 2003. [Citace: 6. 4 2012.] http://www.metal2012.com/files/proceedings/metal_03/papers/18.pdf.
- 37. ČSN ISO 6336-5.** *Výpočet únosnosti čelních ozubených kol s příčnými a šikmými zuby - Část 5: Údaje o pevnosti a kvalitě materiálů*. místo neznámé : Český normalizační institut, 2005. str. 64.
- 38. Totten, G.** *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. místo neznámé : CRC Press, 2006. str. 833.

Seznam obrázků, tabulek a grafů

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma převodovek s čelními koly [14].....	7
Obr. 2 Schéma převodovky s kuželovým soukolím [14]	7
Obr. 3 Schéma šnekové převodovky [14]	7
Obr. 4 Schéma jednoduchého planetového převodu [14]	8
Obr. 5 Schémata nejčastějších konstrukcí planetových převodovek [14]	9
Obr. 6 Schéma automobilového diferenciálu [14]	9
Obr. 7 Schémata excentrické planetové a), cykloidální b) a harmonické převodovky c) [14]	10
Obr. 8 Schémata třecích variátorů.....	10
Obr. 9 Strojovna s převodovkou a asynchronním generátorem [4].....	11
Obr. 10 Strojovna s multipólovým synchronním	11
Obr. 11 Příklady převodovek pro větrné elektrárny	12
Obr. 12 Vliv legujících prvků	15
Obr. 13 Schéma Guinier-	16
Obr. 14 Neumannův rovnovážný diagram [18]	21
Obr. 15 Kyslíková sonda [19]	22
Obr. 16 Hloubka cementované vrstvy v závislosti na cementační teplotě a době cementování [12]	23
Obr. 17 Koncentrační profily uhlíku při	24
Obr. 18 Průběh uhlíkového potenciálu během cementování ozubených kol	24
Obr. 19 Závislost poměru složek atmosféry	25
Obr. 20 Schéma způsobů kalení po.....	26
Obr. 21 Schéma plazmového cementování.....	28
Obr. 22 Povrchová tvrdost zubů v závislosti na.....	29
Obr. 23 Vsázková šachtová pec [23].....	29
Obr. 24 Víceúčelová pec [23]	30
Obr. 25 Vakuová pec [23].....	30
Obr. 26 Povrchová vrstva vytvořená nitro-.....	31
Obr. 27 Závislost doby nitrocementování a	31
Obr. 28 Zkouška prokalitelnosti pro nitrocemen-	32
Obr. 29 Schematické znázornění superpozice tří druhů.....	34
Obr. 30 Tepelná pnutí při kalení [23].....	34
Obr. 31 Měrný objem fází uhlíkové oceli při.....	35
Obr. 32 Strukturní pnutí při kalení [23]	35
Obr. 33 Rozložení pnutí ve válcovém tělese.....	36
Obr. 34 Vliv teploty a doby popouštění na velikost.....	37
Obr. 35 Průběh napětí v povrchové vrstvě.....	37
Obr. 36 Oxidační metoda[28]	45
Obr. 37 Metoda nauhličování [29].....	46
Obr. 38 Metoda leptání [30].....	46
Obr. 39 Planimetrická metoda [31].....	47
Obr. 40 Vzorek W11-1, řádkovitost, zvětšení 25x.....	51

Obr. 41	Vzorek W11-1, zvětšení 500x.....	51
Obr. 42	Vzorek W11-2, řádkovitost, zvětšení 25x.....	51
Obr. 43	Vzorek W11-2, zvětšení 500x.....	51
Obr. 44	Vzorek W11-6, řádkovitost, zvětšení 25x.....	52
Obr. 45	Vzorek W11-6, zvětšení 200x.....	52
Obr. 46	Vzorek W11-7, řádkovitost, zvětšení 25x.....	52
Obr. 47	Vzorek W11-7, zvětšení 200x.....	52
Obr. 48	Vzorek W11-10, řádkovitost, zvětšení 25x.....	53
Obr. 49	Vzorek W11-10, zvětšení 500x.....	53
Obr. 50	Vzorek W11-12, řádkovitost, zvětšení 25x.....	53
Obr. 51	Vzorek W11-12, zvětšení 500x.....	53
Obr. 52	Vzorek W11-14, řádkovitost, zvětšení 25x.....	54
Obr. 53	Vzorek W11-14, zvětšení 500x.....	54
Obr. 54	Vzorek W11-19, řádkovitost, zvětšení 25x.....	54
Obr. 55	Vzorek W11-19, zvětšení 500x.....	54
Obr. 56	Vzorek W11-24, řádkovitost, zvětšení 25x.....	55
Obr. 57	Vzorek W11-24, zvětšení 500x.....	55
Obr. 58	Vzorek W11-27, řádkovitost, zvětšení 25x.....	55
Obr. 59	Vzorek W11-27, zvětšení 500x.....	55
Obr. 60	Vzorek W11-28, řádkovitost, zvětšení 25x.....	56
Obr. 61	Vzorek W11-28, zvětšení 500x.....	56
Obr. 62	Vzorek W12-31, řádkovitost, zvětšení 25x.....	56
Obr. 63	Vzorek W12-31, zvětšení 500x.....	56
Obr. 64	Vzorek W12-33, řádkovitost, zvětšení 25x.....	57
Obr. 65	Vzorek W12-33, zvětšení 500x.....	57
Obr. 66	Vzorek W12-34, řádkovitost, zvětšení 25x.....	57
Obr. 67	Vzorek W12-34, zvětšení 500x.....	57
Obr. 68	Vzorek W12-36, řádkovitost, zvětšení 25x.....	58
Obr. 69	Vzorek W12-36, zvětšení 500x.....	58
Obr. 70	Vzorek W12-37, řádkovitost, zvětšení 25x.....	58
Obr. 71	Vzorek W12-37, zvětšení 500x.....	58
Obr. 72	Vzorek W12-40, řádkovitost, zvětšení 25x.....	59
Obr. 73	Vzorek W12-40, zvětšení 500x.....	59
Obr. 74	Vzorek W12-41, řádkovitost, zvětšení 25x.....	59
Obr. 75	Vzorek W12-41, zvětšení 500x.....	59
Obr. 76	Vzorek W12-42, řádkovitost, zvětšení 25x.....	60
Obr. 77	Vzorek W12-42, zvětšení 500x.....	60
Obr. 78	Tepelný režim experimentu – 35 hodin	61
Obr. 79	Tepelný režim experimentu – 87 hodin	61
Obr. 80	Vzorek W12-37 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	62
Obr. 81	Vzorek W12-36 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	62
Obr. 82	Vzorek W12-33 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	62
Obr. 83	Vzorek W11-7 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	63
Obr. 84	Vzorek W11-2 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	63

Obr. 85 Vzorek W11-1 - změna řádkovitosti po TZ, zvětšení 25x	63
Obr. 86 Prokalitelnost oceli 18CrNiMo7-6 [25]	75
Obr. 87 Popouštěcí křivka oceli 18CrNiMo7-6 [14].....	75
Obr. 88 Dendrity v jádře zubu ozubeného kola	78

Seznam tabulek

Tab. 1 Oceli pro zušlechťování [14]	14
Tab. 2 Oceli pro povrchové kalení [12]	14
Tab. 3 Oceli pro cementování [14]	16
Tab. 4 Oceli pro nitridování [14].....	17
Tab. 5 Oceli pro nitrocementování [14].....	18
Tab. 6 Cementační atmosféry [20].....	22
Tab. 7 Vliv podchlazování na množství zbytkového austenitu v oceli 34CrMo4	27
Tab. 8 Maximální přípustné množství vměstků podle vnitropodnikové normy	40
Tab. 9 Chemické složení oceli 18CrNiMo7-6 [14].....	40
Tab. 10 Mechanické vlastnosti oceli 18CrNiMo7-6[14]	41
Tab. 11 Hodnoty tvrdosti oceli 18CrNiMo7-6 [14].....	41
Tab. 12 Doporučené teploty tepelného zpracování oceli 18CrNiMo7-6 [14].....	41
Tab. 13 Další technologické vlastnosti oceli 18CrNiMo7-6 [14]	42
Tab. 14 Vlastnosti sulfidu železnatého a sulfidu manganatého [26].....	42
Tab. 15 Vlastn. oxidu železnatého, oxidu manganatého, oxidu křemičitého a oxidu hlinitého [26]	43
Tab. 16 Vlastnosti hlinitanu železa a hlinitanu manganu [26].....	43
Tab. 17 Vlastn. ortokřemičitanu železa, křemičitanu železa a manganu a křemičitanu vápníku [26] ..	43
Tab. 18 Přepočítávání velikosti austenitického zrna při různém zvětšení dle GOST 5639-82 [33]	47
Tab. 19 Mikročistota podle ČSN ISO 4967	49
Tab. 20 Velikost austenitického zrna podle ČSN EN ISO 643.....	50
Tab. 21 Tvrdost HV10	60
Tab. 22 Vybrané požadavky na kvalitu materiálu cementovaných ocelí stupně ME [37].....	74
Tab. 23 Stanovení mikročistoty vzorku W11-10	76
Tab. 24 Etalony pro hodnocení řádkovitosti pro ocel s 0,10 až 0,25 % C podle ČSN 42 0469 [35]....	77

Seznam grafů

Graf 1 Růst celosvětového instalovaného výkonu větrných elektráren (1996 – 2010) [2].....	2
Graf 2 Podíl jednotlivých zemí na přírůstku	3
Graf 3 Podíl jednotlivých zemí na celkovém	3
Graf 4 Vývoj instalovaného výkonu v ČR v letech 2004 -2010 [4].....	4
Graf 5 Deset největších výrobců větrných elektráren podle tržního podílu v roce 2009 [6]	6
Graf 6 Rozdělení výrobců větrných elektráren podle instalovaného výkonu v ČR k 10. 1. 2011 [4]	6

Přílohy

Příloha č. 1

Požadavky	Stupeň kvality ME																								
Chemické složení ^a	Atest podle ISO 10474 na vzorku ze stejné tavby.																								
Prokalitelnost zkoušená podle Jominyho (viz ISO 642)	Atest podle ISO 10474 na vzorku ze stejné tavby.																								
Čistota tavby ^b	<p>Ocel musí být uklidněná, rafinovaná v pánvi a vakuovaná. Během lití z pánve či odlévání musí být chráněna proti opětovné oxidaci. Přidání vápníku při tavbě – maximálně 15 ppm (= 15µg/g) – je nutného zlepšení slévateľnosti materiálu za souhlasu konečného uživatele. Maximální obsah kyslíku je 25 ppm (= 25µg/g). Čistota podle ISO 4967, postup podle metody B, list II, kontrolovaná plocha přibližně 200 mm² a následující přejímací tabulka. Jsou dovoleny i další postupy, které prokazují ekvivalentním způsobem čistotu. Atest podle ISO 10474</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="2">A</th> <th colspan="2">B</th> <th colspan="2">C</th> <th colspan="2">D</th> </tr> <tr> <th>Jemný</th> <th>Hrubý</th> <th>Jemný</th> <th>Hrubý</th> <th>Jemný</th> <th>Hrubý</th> <th>Jemný</th> <th>Hrubý</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>3,0</td> <td>2,0</td> <td>2,5</td> <td>1,5</td> <td>1,0</td> <td>1,0</td> <td>1,5</td> <td>1,0</td> </tr> </tbody> </table>	A		B		C		D		Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	3,0	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0
A		B		C		D																			
Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý	Jemný	Hrubý																		
3,0	2,0	2,5	1,5	1,0	1,0	1,5	1,0																		
Stupeň prokování ^c	Nejméně 3:1																								
Velikost zrna podle ISO 643	Jemné zrno, převážně 5 a jemnější. Atest podle ISO 10474																								

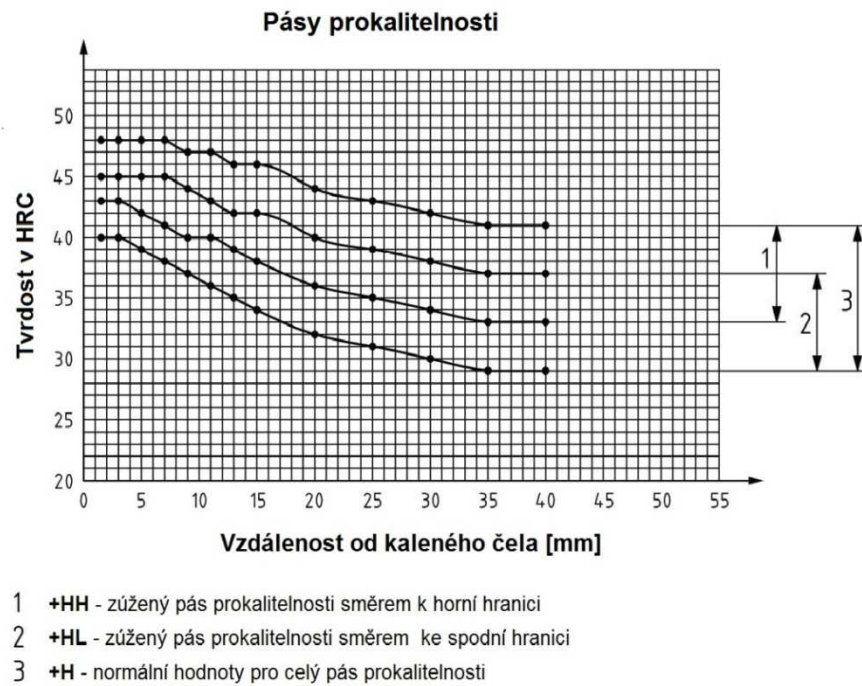
a) Vybraný materiál je vybrán buď v relevantním stupni podle ISO 683-1, -2, -10 (doporučení) nebo v příslušné národní normě.

b) Stupeň čistoty požadovaný v těch částech materiálu ozubených kol, kde budou umístěny zuby mezi dokončeným hlavovým průměrem a nejméně dvojnásobkem výšky zubu. U ozubených kol s vnějším ozubením, bude tato část polotovaru ozubeného kola běžně menší než 25 % poloměru.

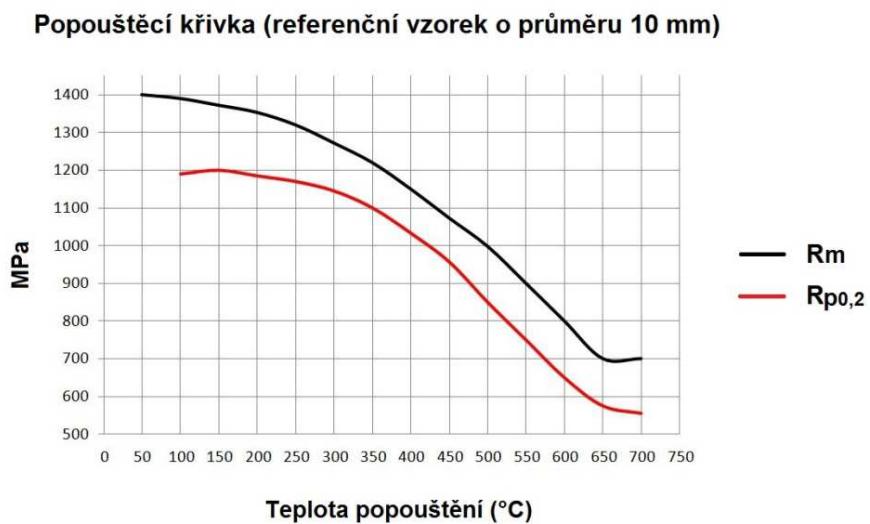
c) Stupeň prokování je celková redukce bez ohledu na metodu. Platí pro výkovky z materiálu odlitého do ingotu. U kontinuálně litého materiálu je minimální stupeň prokování 5:1.

Tab. 22 Vybrané požadavky na kvalitu materiálu cementovaných ocelí stupně ME [37]

Příloha č. 2



Obr. 86 Prokalitelnost oceli 18CrNiMo7-6 [25]



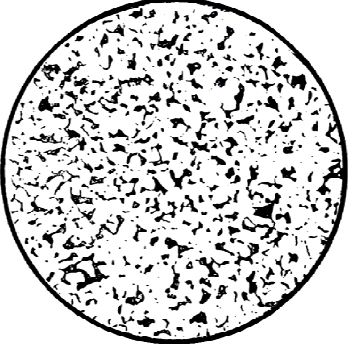




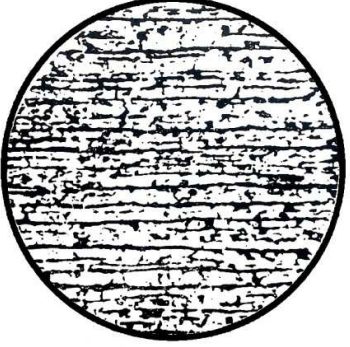
Obr. 87 Popouštěcí křivka oceli 18CrNiMo7-6 [14]

Příloha č. 3

Pole	Vměstky typu A		Vměstky typu D	
	Jemné	Hrubé	Jemné	Hrubé
1	-	2	0,5	-
2	-	-	0,5	-
3	-	-	1	0,5
4	0,5	-	0,5	-
5	-	-	-	0,5
6	-	-	0,5	-
7	-	-	1	-
8	0,5	-	0,5	-
9	1	0,5	0,5	-
10	1	-	-	-
11	1	-	-	-
12	1	-	0,5	-
13	0,5	-	-	-
14	0,5	-	0,5	0,5
15	-	-	0,5	-
$i_{\text{celk}} = (4 \times 0,5) + (4 \times 1) = 6$ $i_{\text{stř}} = 6/15 = 0,400$ $i_{\text{celk}} = (1 \times 0,5) + (1 \times 2) = 2,5$ $i_{\text{stř}} = 2,5/15 = 0,167$ $i_{\text{celk}} = (9 \times 0,5) + (2 \times 1) = 6,5$ $i_{\text{stř}} = 6,5/15 = 0,433$ $i_{\text{celk}} = (3 \times 0,5) = 1,5$ $i_{\text{stř}} = 1,5/15 = 0,100$				
i_{celk}	6	2,5	6,5	1,5
$i_{\text{stř}}$	0,400	0,167	0,433	0,100

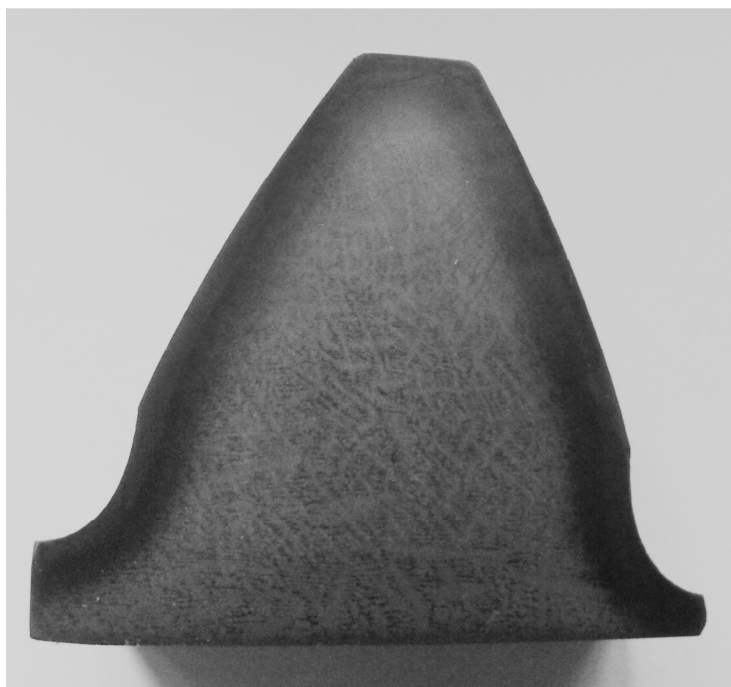
Tab. 23 Stanovení mikročistoty vzorku W11-10

Příloha č. 4

ŘÁDKOVITOST STRUKTURY Zvětšení 100x Etalonová řada 2B (0,10 až 0,25 % C)		
<p>Stupeň 0</p> <p>Rovnoměrné rozložení zrna feritu a perlitu bez výskytu řádkovitosti</p>	<p>Stupeň 1</p> <p>Několik nespojitých řádků</p>	<p>Stupeň 2</p> <p>Několik nespojitých řádků a 1 až 3 spojité řádky procházející celým zorným polem</p>
		
<p>Stupeň 3</p> <p>Několik spojitých řádků procházejících celým zorným polem</p>	<p>Stupeň 4</p> <p>Několik nespojitých řádků a spojité řádky rozložené rovnoměrně v celém zorném poli</p>	<p>Stupeň 5</p> <p>Výrazné řádky procházející celým zorným polem</p>
		

Tab. 24 Etalony pro hodnocení řádkovitosti pro ocel s 0,10 až 0,25 % C podle ČSN 42 0469 [35]

Příloha č. 5



Obr. 88 Dendrity v jádře zubu ozubeného kola