# PROJEKT I

## Materiálová část

**Zadání**

**Pro danou ozubenou součást převodovky vypracujte podrobný postup tepelného zpracování (TZ), případně chemicko-tepelného zpracování (CHTZ). Uvažujte potřebné mechanické vlastnosti, konstrukční, technologické a ekonomické hledisko. Navrhněte pro uvažovanou součást alternativní materiál s jiným typem tepelného (chemicko-tepelného) zpracování.**

**Instrukce**

- Pro ozubený díl převodovky zadaný v Technologické části Projektu navrhněte vhodný materiál a vypracujte podrobný postup tepelného zpracování - návodku.
- Vypracujte bodový technologický postup výroby součásti včetně výrobního výkresu.
- Uvažujte konstrukční, technologické a ekonomické hledisko výroby.
- Pro navržený postup TZ (CHTZ) vypracujte termogram.
- Zhodnoťte v závěru cenu materiálu, spotřebu času při TZ (CHTZ), náročnost zpracování (použitá média apod.) a dosažené finální vlastnosti.

*Seznam TZ a CHTZ používaných u ozubených součástí:*

2. Klasické zušlechťování (kalení a popouštění na vysokou teplotu)
3. Klasické zušlechťování a následné nitridování
4. Klasické zušlechťování a následné karbonitridovaní
5. Nitrocementace a následné tepelné zpracování
6. Cementace a následné tepelné zpracování
7. Normalizace a povrchové kalení (méně namáhaná ozubená kola)
8. Klasické zušlechťování a povrchové kalení

**PROBLEMATIKA NÁVRHU MATERIÁLU:**

Vzhledem k tomu, že všechny strojní součásti pracují v komplikovaných podmínkách (komplexní charakter zatěžování), je volba vhodného materiálu klíčovým problémem, na němž závisí správná funkce součásti po navrhovanou dobu životnosti. Je třeba uvažovat mechanické požadavky (pevnost, mez kluzu, mez únavy, odolnost proti opotřebení...), vliv okolního prostředí (teplota, korozní podmínky,...), technologické požadavky (obrobitelnost, tvařitelnost, svařitelnost...) a samozřejmě cenu (materiál, použitá technologie, počet vyráběných kusů...).

Samotný materiál ve stavu po dodání (hodnoty mechanických vlastností, uvedené v normě) není schopen splnit požadavky kladené na součást bez správně navrženého technologického postupu a zejména vhodného tepelného zpracování. Z toho vyplývá, že pevnostní výpočty dílů převodovky se musí provádět nikoli s hodnotami, uvedenými v normě v dodaném (žíhaném) stavu, ale ***ZÁSADNĚ*** s hodnotami, dosaženými po tepelném zpracování. To znamená s tvrdostí (pevností) jádra po kalení a popouštění pro výpočty ohybových a točivých momentů a sil, a s tvrdostí povrchových vrstev pro úvahy o povrchové kontaktní únavě, opotřebení atd. Vzhledem k údajům o dosažitelných vlastnostech různých ocelí je nutné obeznámit se rovněž s indexem prokalitelnosti, ARA diagramy, případně popouštěcími diagramy.

Z uvedených informací rovněž vyplývá, že použití nelegovaných ocelí tříd 11 a 12 je pro ozubené součásti ***zcela nevhodné***, protože neumožňuje tyto součásti tepelně zpracovat na

definované hodnoty mechanických vlastností jádra a často (v případě většího počtu kusů ve vsázce) ani povrchu.

## PROBLEMATIKA TZ A CHTZ

### Teplota a čas

Aby byla dosažena požadovaná struktura, která ovlivňuje zejména mechanické vlastnosti materiálu, je třeba dodržet rychlosti ohřevů na správně zvolené teploty a následný způsob ochlazení. Doporučené hodnoty teplot a výdrží na teplotách pro jednotlivé způsoby TZ a CHTZ jsou součástí materiálových listů a norem jednotlivých ocelí. Lze je také najít v příručkách pro TZ (Jech: Tepelné zpracování ocelí) resp. v ARA diagramech.

### Ohřev

Rychlost ohřevu závisí na mnoha faktorech. Roli hrají zejména: materiál a jeho tepelná vodivost, množství, velikost a rozložení součástí v peci, způsob ohřevu pece (indukční, odporové, plynové,…) a podmínky přenosu tepla, které jsou velmi výrazně závislé na výši konečné teploty. Platí, že čím je žádaná teplota vyšší, tím je ohřev rychlejší. Největší problémy proto způsobují ohřevy na nízké teploty, kdy je teplotní gradient malý, přirozená konvekce v peci minimální a ohřev radiací zanedbatelný. Vzhledem k tomu je nutné zajistit cirkulaci atmosféry v peci ventilátorem!

Existuje řada matematických modelů popisujících danou problematiku, avšak v praxi jsou používány obvykle závislosti zpracované v grafické podobě nebo zjednodušené výpočty s řadou tabelovaných koeficientů. Pro účely Projektu uvažujte čas, potřebný pro ohřev na teploty vyšší, než $A_1$ podle empirického pravidla 1 min na mm tloušťky charakteristického rozměru tělesa. V případě ohřevů na teploty kolem 500 – 600 °C je zapotřebí uvedený čas vynásobit opravným koeficientem 1.5 – 2, protože přestup tepla při nižší teplotě je horší. V případě nízkoteplotního popouštění do 200 °C se čas násobí koeficientem 4 – 8 při nucené cirkulaci atmosféry ventilátorem.

### Výdrž na teplotě

Výdrž na teplotě je důležitým parametrem TZ a CHTZ. Musí být dostatečně dlouhá, aby proběhly požadované změny ve struktuře materiálu spojené s difúzními pochody, avšak její nadměrné prodlužování vede často k negativním důsledkům (růst zrna).

Pro účely ohřevu na kalící teplotu je nezbytné použití ochranné atmosféry. Ta musí chránit součást před oduhličením a okujením. Vzhledem k obsahu uhlíku ve zpracovávané oceli proto musí mít dostatečně vysoký uhlíkový potenciál, aby nedocházelo k oduhličování, ani k nauhličování povrchu. Rovněž je nutné chránit povrch před nežádoucím okujením. Pro nalezení vhodné ochranné atmosféry doporučujeme použít webové stránky společností, dodávajících technické plyny do ČR, např. Linde, Air Liquide.

Pro účely popouštění na vysoké teploty (nad 500 °C) musí být součásti chráněny před oxidací. Oduhličení v těchto případech je zanedbatelné. Pro použití při teplotách nižších, než 750 °C se v žádném případě nesmí používat atmosféry, složené z produktů štěpení uhlovodíků, respektive obsahující kysličník uhelnatý a vodík. Hrozí nebezpečí exploze. Pro nalezení vhodné ochranné atmosféry doporučujeme použít webové stránky společností, dodávajících technické plyny do ČR, např. Linde, Air Liquide, Air Products a podobně.

Pro popouštění při teplotách pod 500 °C není použití ochranné atmosféry nutné.

### Ochlazování

Rychlost ochlazování záleží na typu tepelného zpracování a požadované finální struktuře. Pro určení výsledných struktur ocelí se využívají diagramy izotermického rozpadu austenitu (IRA) a anizotermického rozpadu austenitu (ARA).

Parametry ochlazování pro konkrétní podmínky (austenitizační teplota, velikost součásti, ochlazovací medium) jsou pro obvykle používané materiály zpracovány v grafické podobě.

Diagramy ARA spolu s ochlazovacími křivkami jsou vodítkem pro stanovení parametrů pro tepelné zpracování dané oceli a rovněž pro volbu vhodného materiálu.
Pro žíhací procesy není rychlost ochlazování u ocelí kritickou hodnotou, protože se zpravidla ochlazuje pomalu a v součásti vždy vznikne požadovaná feriticko – perlitická struktura.
V případě kalení nebo zušlechťování je rychlost ochlazování, dosažitelná pro dané rozměry součásti, pro daný materiál rozhodující. Například pro austenitizační teplotu 850 °C a průměr tyče 50 mm platí následující orientační hodnoty: ochlazování v klidné vodě (20 °C) trvá v celém průřezu přibližně řádově několik minut, ochlazení na povrchu cca desítky vteřin. V klidném oleji (20 °C) je doba ochlazení celého průřezu asi 20 minut (ochlazení povrchu trvá zhruba 1 minutu). Při ochlazování na klidném vzduchu trvá prochlazení průřezu asi 3 hodiny, zatímco povrch je ochlazen po 20 minutách. Z uvedeného tedy jasně plyne, že použití ocelí s nízkou prokalitelností (nelegované oceli) je pro ozubené součásti zcela nevhodné a v dnešní výrobě se oceli tříd 11 a 12 používají pouze ve výjimečných případech a nikdy ne v sériové výrobě kol, pastorků či hřídelí. Pro volbu materiálu je nezbytné přihlédnout k ARA diagramům ocelí, které přicházejí v úvahu, rovněž pak k velikosti vsázky (počtu kusů, kalených najednou) a vlastnostem ochlazovacího média. Rovněž je nezbytné vzít v úvahu změny vlastností ochlazovacího média v závislosti na teplotě (zejména u olejů).
Použijí-li se např. jiná ochlazovací media, je třeba ochlazovací křivky pro dané podmínky proměřit. Pokud ochlazování probíhá pomalu v peci, je regulováno automatikou agregátu podle požadavků obsluhy.

## Tepelné zpracování

### Normalizace

Je to velmi často užívané tepelné zpracování jehož účelem je optimalizovat (zrovnoměrňovat) strukturu po některých typech technologických operací (slévání, svařování, tváření atd.). Normalizace je často zařazována jako přípravná operace před další TZ nebo CHTZ. Toto tepelné zpracování neodstraňuje vnitřní pnutí! Ohřev 30 – 50 °C nad $A_{c3}$ s dobou výdrže obvykle 1 až 4 hodiny (závislé na velikosti součásti zejména tloušťce stěny). Pro normalizaci není nutné použití ochranných atmosfér, protože negativně ovlivněná vrstva (okujení, oduhličení) se odstraní obráběním. Lze použít empirické pravidlo 30 minut výdrže na každých 25 mm tloušťky. Ochlazení obvykle probíhá na vzduchu nebo řízeným režimem v peci.

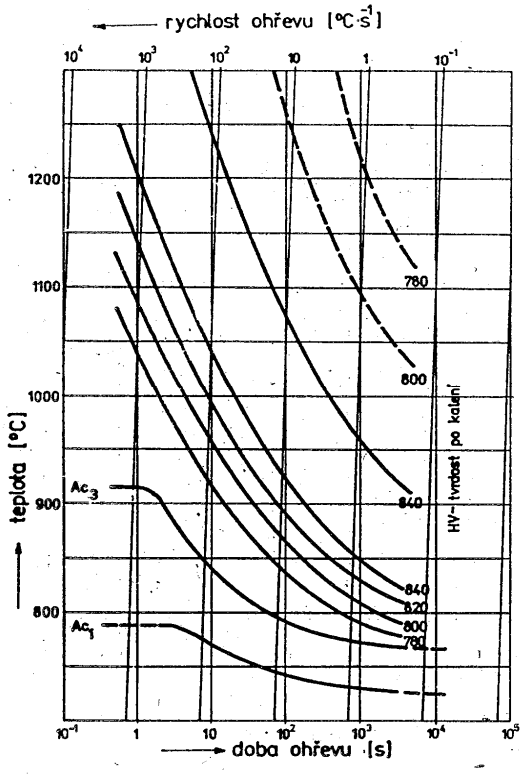
### Žíhání na měkko

Používá se u materiálů se zhoršenou obrobitelností. Empiricky určená hodnota obsahu uhlíku, stanovující skupiny ocelí, které se před obráběním žíhají normalizačně a na měkko, je 0.4 %C. Oceli s nižším obsahem uhlíku se žíhají normalizačně, protože žíhání na měkko by vedlo k příliš nízké tvrdosti a materiál by se „mazal“ na nástroje. Naopak, oceli s vyšším %C se musí žíhat na měkko. U nadeutektoidních legovaných ocelí je dokonce žíhání na měkko zcela nezbytné, aby se tyto materiály vůbec daly obrábět. Při žíhání se ocel ohřeje těsně pod teplotu $A_{c1}$ s výdrží 2 až 4 hodiny nebo při modifikovaném postupu kolem této teploty kolísá. Následuje pomalé ochlazení v peci rychlostí 10 °C/h do teploty 600 °C. Další ochlazování je nejčastěji na vzduchu. Ve struktuře oceli se cementit vyskytuje v globulární podobě, která dává oceli nižší tvrdost, vyšší houževnatost a lepší obrobitelnost.
Pro žíhání na měkko není zpravidla nutné použití ochranných atmosfér, protože negativně ovlivněná vrstva (okujení, oduhličení) se odstraní obráběním. Pouze v případě, trvá – li proces dlouho (vysokolegované oceli, které se žíhají deset a více hodin) se ochranná atmosféra musí použít.

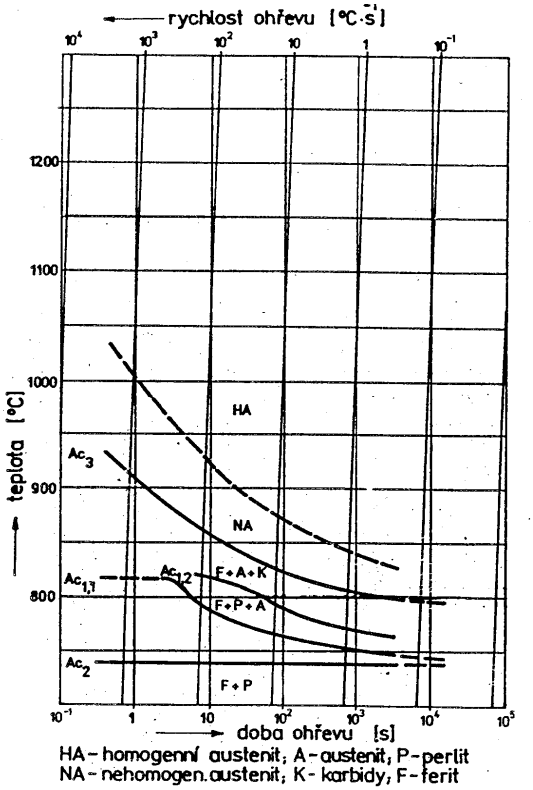
### Kalení a popouštění

Doba výdrže na austenitizační teplotě kalených součástí musí být v souladu s austenitizačním diagramem dané oceli (nutno nastudovat!) a závisí také na charakteristickém rozměru

součásti. Do charakteristického rozměru součásti cca 50 mm je nutno počítat s dobou výdrže obvykle 15 až 20 minut, pro větší součásti pak 30 minut i více.

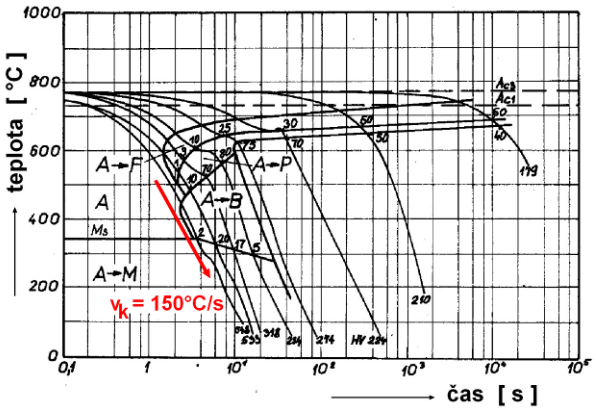



Austenitizační diagram 12 050 (C45E)

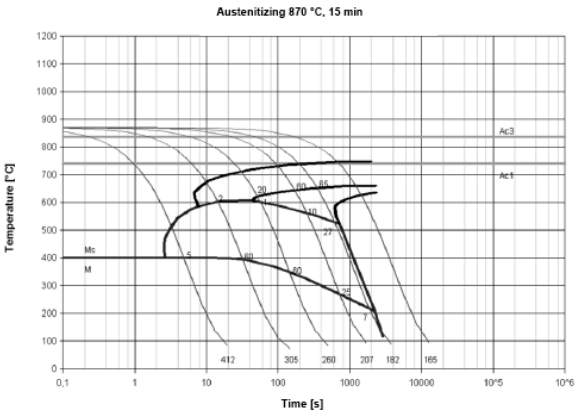



Austenitizační diagram 14 140 (37Cr4)

Pro ohřev je naprosto nezbytné, aby byly součásti chráněny před negativními jevy. Jsou to zejména okujení a oduhličení. Bez použití ochranné atmosféry dojde k degradaci povrchu do hloubky několika desetin milimetrů, což při uvážení, že výrobní tolerance ozubení a funkčních ploch se pohybují řádově v tisícinách a setinách milimetru, vede vlastně ke znehodnocení celé součásti. Pro volbu ochranné atmosféry a pravidla pro její použití navštivte webové stránky společností, dodávajících tyto atmosféry na český trh.
Ochlazení probíhá v souladu s požadovanými parametry (materiálový list, ARA diagramy). Většinou se vyžaduje, aby struktura byla čistě martenzitická. Dále je nezbytné vzít v úvahu manipulaci s materiálem (vsázkou) v peci, která trvá řádově několik desítek vteřin. Toto je nezbytné vzít v potaz již při SAMOTNÉ VOLBĚ MATERIÁLU!!!

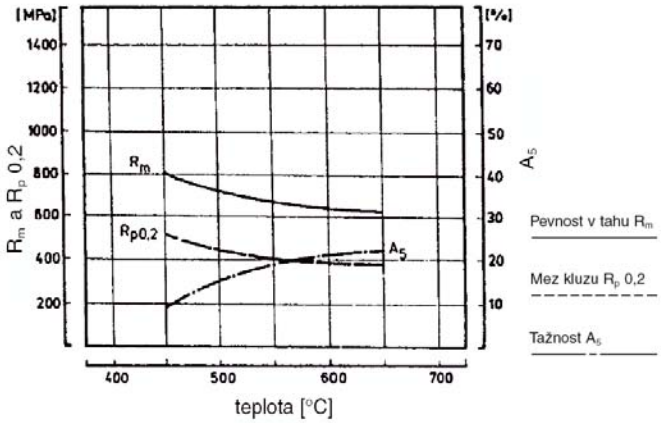


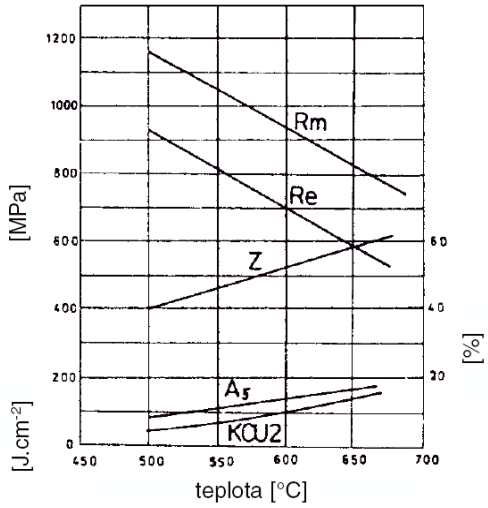

Ara diagram oceli 12 050 (C45E)



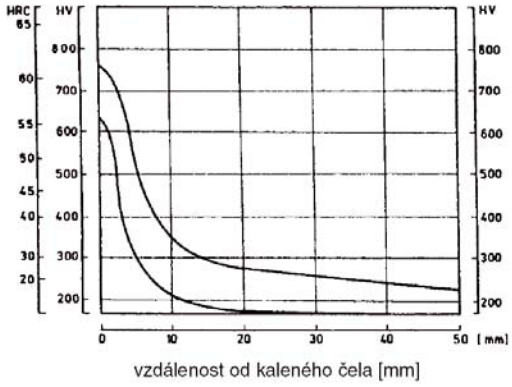

ARA diagram oceli 14 220 (16MnCr5)

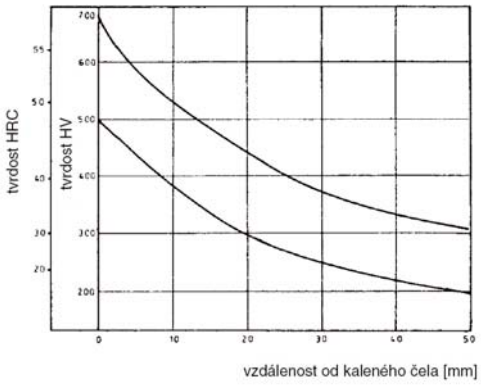
Následné popouštění probíhá obvykle při teplotách 300 °C – 650 °C po dobu 1 až 2 hodiny. Volba teploty popouštění se řídí tzv. popouštěcími diagramy, které znázorňují závislost mechanických vlastností (tvrdost, pevnost, mez kluzu, tažnost, houževnatost) na výši popouštěcí teploty, době popouštění, resp. na obou těchto parametrech. Pro stanovení doby ohřevu je nutné počítat již s výše zmíněných pravidlem 1 min na mm tloušťky součásti, avšak při nižších teplotách je nezbytné čas vynásobit opravným koeficientem 1.5 (pro teploty 500 °C – 650 °C), resp. i vyšším pro nižší teploty. Následné ochlazení z popouštěcí teploty je dáno chemickým složením oceli a zamezením možnosti výskytu popouštěcí křehkosti (uvedeno v materiálovém listu). V projektu je nutné toto zdůvodnit!
Pro popouštění nad teplotou 500 °C je nezbytné použití ochranné atmosféry, která bude chránit součásti zejména proti vnitřní oxidaci. Oduhličení při těchto teplotách není bezprostřednou hrozbou. POZOR: Pro volbu ochranné atmosféry je nebytné mít na paměti, že použití atmosfér, získaných štěpením uhlovodíků či jejich derivátů, je pod teplotou 750 °C




životu nebezpečné z důvodu jejich explozivity. Pro bližší informace a volbu konkrétní atmosféry navštivte webové stránky dodavatelů těchto atmosfér do ČR.



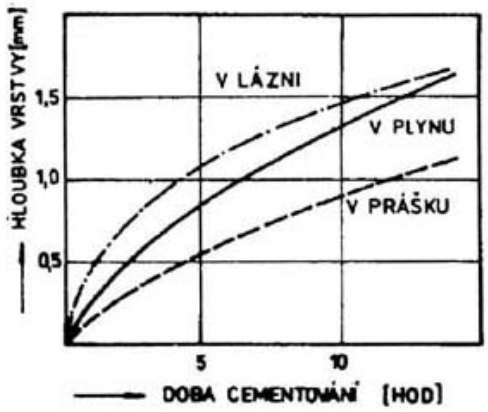

Popouštěcí diagramy a pásy prokalitelnosti ocelí 12 050 (vlevo) a 14 340 (vpravo)

**Povrchové kalení (indukční, plamenem):**
Povrchová vrstva součásti je ohřívána na kalící teplotu koncentrovaným zdrojem energie (induktory, hořáky, laserový paprsek atd.) zatímco jádro zůstává prakticky bez tepelného ovlivnění.
Vzhledem k velmi krátkým časům austenitizace je třeba austenitizační teplotu uvažovat 150 – 250 °C nad teplotu $A_{c3}$ v rovnovážném diagramu železo – uhlík. Pro volbu austenitizační teploty je nezbytné použít austenitizační diagram!!! Platí, že čím rychlejší je ohřev, tím je nutnost použití vyšší austenitizační teploty, protože nedostatek času, potřebného pro proběhnutí difúzních dějů (přeměny perlit a feritu na austenit, homogenizace austenitu) se

musí nahradit zvýšenou teplotou. I tak bývá tvrdost povrchově zpracovávaných dílů o něco nižší, než u dílů zpracovaných objemově ze stejné značky oceli.
Rychlost ohřevu je vysoká (u indukčního ohřevu obvykle v rozsahu 240 – 420 °C/s). Ochlazení následuje okamžitě po ohřevu, zpravidla vodní sprchou. Následuje popouštění na nízké teploty do 200 °C v peci.
Existují postupy s ohřevem celého objemu materiálu, avšak je třeba použít speciálních ocelí s velmi malou prokalitelností a proces kalení předem odzkoušet.
Kola s modulem zubu do 5 mm se ohřívají kontinuálně a kalí se jen boky zubů, pro kola s větším modulem se využívá ohřevu zub po zubu a kalí se i pata zubu. Tloušťka zakalené vrstvy je 0.8 až 5 mm. *Hrozí tak nebezpečí nepřípustného prokalení pat zubů s modulem menším než 3 mm!* **Povrchové kalení se pro modul menší než 2,5 mm nedoporučuje!**
Pro výběr induktorů pro kalení indukčním ohřevem navštivte webové stránky dodavatelů těchto zařízení do ČR, např. firma Aichelin. Je nezbytné uvědomit si, že zařízení pro indukční kalení je zpravidla jednoúčelové a včetně regulační a ovládací skříně poměrně nákladné, takže je zapotřebí zvážit návratnost investice.

## Chemicko-tepelné zpracování

Více než 95 % ozubených strojních součástí je zpracováváno cementací nebo nitrocementací. Cementace je využívána pro větší součásti a výkony, například převodovky automobilů. Subtilní součásti např. převodovky vrtaček jsou nitrocementovány.




Hloubka cementační vrstvy v závislosti na době cementace v uvedených prostředích

### Cementování

Proces cementování sestává z ohřevu, z výdrže na teplotě sestávající ze dvou fází (sytící a difúzní periody), následného kalení a nízkoteplotního popouštění.
Úvodem je důležité poznamenat, že při výpočtu doby cementace není nutné uvažovat dobu ohřevu, protože cementace probíhá pouze na povrchu součásti, který je ohřátý velmi rychle a celá součást je bez problémů prohřátá na požadovanou teplotu během cementačního (nitrocementačního) procesu.
Při cementaci a nitrocementaci jsou hlavní výkresové parametry hloubka cementované (nitrocementované) vrstvy v mm (označené Eht (CHD) a hodnota tvrdosti v požadované hloubce), povrchová tvrdost (v HV nebo HRC) a tvrdost jádra. Např. Eht 550 = 0.4 mm znamená, že v hloubce 0.4 mm musí být po cementaci, kalení a popouštění tvrdost 550 HV 1. *Pro vypracování technologického postupu je nutné tyto parametry na začátek uvádět!!!*

**Příklady zápisu údajů do výkresové dokumentace – předpis cementované vrstvy: ***

| | | |
|---|---|---|
| Cementovat a kalit 58 – 60 HRC | Cementovat a kalit $58^{+2}$ HRC | |
| Eht = (0,5 – 0,7) mm | Eht = $0{,}5^{+0{,}2}$ mm | ** |
| Tvrdost jádra = (300 – 380) HV | Tvrdost jádra = $300^{+80}$ HV | |

*V případě, že je kritérium hloubky cementované vrstvy jiné než 550 HV1:*

| | |
|---|---|
| Cementovat a kalit 59 – 61 HRC | * tvrdost vrstvy lze předepsat i tvrdostí HV |
| $Eht_{575}$ = (0,4 – 0,6) mm | ** označení Eht je totožné s označením CHD |
| Tvrdost jádra = $320^{+50}$ HV | |

Podle požadovaných parametrů jádra a vrstvy se volí vlastní tepelné zpracování. Základními parametry cementace jsou teplota, doba výdrže na cementační teplotě a sytící schopnost cementačního prostředí, vyjádřená tzv. uhlíkovým potenciálem.
Základní 3 způsoby cementace jsou cementace v prášku, v roztavených solných lázních a v plynu. Nejnovějším trendem je tzv. podtlaková cementace, což je vlastně cementace v plynu, avšak za sníženého tlaku v peci.
V dnešní praxi probíhá cementování z 99 % v plynu. Teploty cementace se volí v rozmezí 900 až 950 °C. Vyšší teploty urychlují difúzní proces, ale vedou k nežádoucímu zhrubnutí zrna. Proces nauhličování je řízen teplotou, časem a sytícím potenciálem. Prostředí plynu umožňuje velmi dobrou regulaci podmínek cementování. Pro volbu cementační atmosféry použijte webových stránek výrobců a dodavatelů cementačních a ochranných atmosfér, např. Linde, Air Products, Air Liquide apod.
Cementace v práškových směsích se v dnešní době v průmyslu již nepoužívá. Důvodem je nízká produktivita práce (nutnost vkládání součástí do hermeticky uzavřené plechovky s práškem a zdlouhavá manipulace), špatný a obtížně definovatelný přestup uhlíku do materiálu, snížená reprodukovatelnost procesu a v neposlední řadě nutnost pomalého ochlazení materiálu z cementační teploty, rozbití plechovky, vyjmutí dílů a nutnost opětovného ohřevu na kalící teplotu v ochranné atmosféře, což všechno prodražuje výrobu.
Cementace v solných lázních sice vede k poměrně rychlému sycení povrchové vrstvy, avšak je obtížně regulovatelná z důvodu proměnlivé sytící schopnosti sole. Značným problémem je rovněž ekologičnost procesu. Rovněž typy zařízení (kelímkové solné pece, viz. webové stránky např. firmy Degussa) neumožňují dostatečnou sériovost procesu, proto se tohoto procesu v praxi rovněž moc nepoužívá.

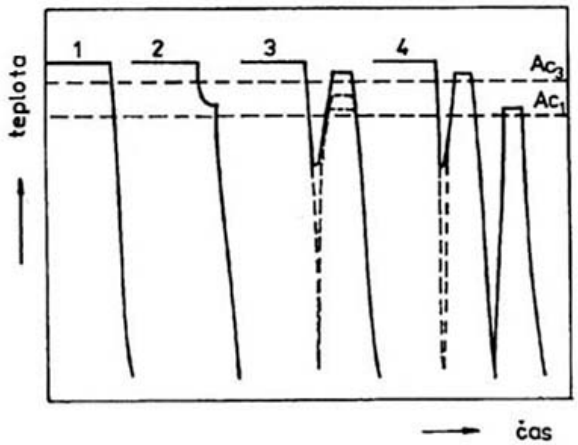


Schéma některých postupů kalení po cementování
1 – přímé z cementační teploty, 2 – s přichlazením,
3 – po normalizačním žíhání, 4 – dvojité kalení

Na obrázku je schématicky znázorněna sytící rychlost různých nauhličujících prostředí.
Následující termogramy ukazují používané postupy kalení (ochlazování) z cementační teploty. Postup č. 1 je nejrychlejší, avšak ve vrstvě může vzniknout velké vnitřní pnutí, spojené s deformacemi součásti a se vznikem trhlin. Postup č. 2 je v současnosti nejobvyklejším způsobem. Součást se po nacementování ochladí na teplotu nižší, než je teplota cementace, avšak vyšší, než teplota $A_3$ základního materiálu (samozřejmě i vrstvy). Z této teploty se pak materiál kalí do oleje. Výhoda tohoto způsobu je v tom, že při kalení z nižší teploty se minimalizují deformace a současně není, na rozdíl od způsobů 3 a 4 zapotřebí opakovaného ohřevu, čímž se dosahuje vyšší produktivity práce, šetří se pecní zařízení a neničí se materiál zbytečným opakovaným ohřevem. Způsoby 3 a 4 se v současné době používají pouze ojediněle. Jejich hlavní využití bylo v minulosti, kdy se pro cementaci hojně používaly metody nauhličování v prášku. Protože při cementaci v prášku nelze součásti ihned kalit, musejí se po zchladnutí vyjmout z nauhličujícího prostředí, následně ohřát a teprve pak kalit.
*Po kalení musí bezpodmínečně následovat nízkoteplotní popouštění!!!* U tohoto popouštění není zapotřebí ochranné atmosféry, popouštět se může ve vzduchové peci s elektrickým odporovým vytápěním. Pro stanovení doby ohřevu se počítá podle empirického pravidla 1 min na milimetr charakteristického rozměru součásti, avšak vzhledem k nízké teplotě a špatnému přestupu tepla je nezbytné takto získaný čas vynásobit opravným koeficientem, cca 4 – 7. To znamená, že např. ozubené kolo s tloušťkou věnce 20 mm se bude na teplotu 180 °C

ohřívat minimálně 80 minut!!! Ochlazování z popouštěcí teploty lze provádět tak, že se součásti vyjmou z pece a dochladí na klidném vzduchu.

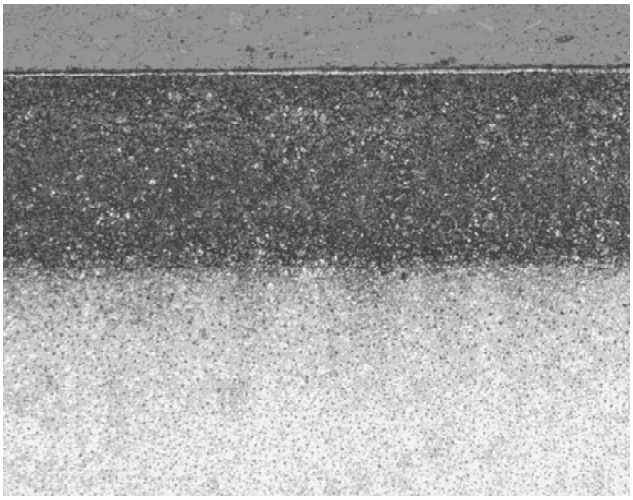
**Nitrocementace**

Je to nauhličující proces ve standardní cementační atmosféře, do níž je přidáván čpavek do cca 5 – 10%. Přídavek čpavku zvyšuje difúzní rychlost uhlíku do materiálu a umožňuje snížit teplotu procesu o 50 – 70 °C ve srovnání s klasickou cementací, což má zejména u menších a subtilních součástí pozitivní vliv na deformace.
Standardní teplota procesu bývá mezi 860 až 870 °C.
Optimální vrstva nitrocementovaných vrstev je 0.2 – 0.4 mm. Vytváření silnějších vrstev se nedoporučuje vzhledem k vysoké náchylnosti povrchu materiálu na přesycení uhlíkem a dusíkem a stabilizaci zbytkového austenitu po kalení. Rychlost tvorby nitrocementačních vrstev je cca 0.1 mm za 1 hod. délky trvání procesu. Při vytváření tenčích vrstev však lze uvažovat i s o něco vyšší rychlostí, takže vrstva silná 0.2 mm se vytvoří za cca 90 minut.
Je nutno opět zdůraznit, že i při nitrocementaci jsou hlavní výkresové parametry hloubka nitrocementované vrstvy v mm (označené Eht (CHD) a hodnota tvrdosti v požadované hloubce), povrchová tvrdost (v HV nebo HRC) a tvrdost jádra. Např. Eht 550 = 0.25 mm znamená, že v hloubce 0.25 mm musí být po nitrocementaci, kalení a popouštění tvrdost 550 HV 1. *Pro vypracování technologického postupu je nutné tyto parametry na začátek uvádět !!!*
Podle požadovaných parametrů jádra a vrstvy se volí vlastní tepelné zpracování. Základními parametry nitrocementace jsou teplota, doba výdrže na nitrocementační teplotě a sytící schopnost nitrocementačního prostředí, vyjádřená tzv. uhlíkovým potenciálem. Ve srovnání s cementací zde však přistupuje jako čtvrtý parametr – přídavek čpavku. Pro volbu nitrocementačního prostředí se doporučuje navštívit internetové stránky výrobců a dodavatelů průmyslových atmosfér.
Po nitrocementaci se kalí přímo z teploty chemicko-tepelného zpracování, zpravidla do oleje. Teplota oleje se volí tak, aby byl dostatečně tekutý, tj. měl nízkou viskozitu a v průběhu kalení vzniklý parní polštář se od dílců dobře odděloval. Na druhou stranu zase teplota oleje nesmí přesáhnout určitou hodnotu, protože pak dochází k jeho rychlému opotřebení, nehledě na riziko možného vzplanutí.
Po kalení musí bezpodmínečně následovat nízkoteplotní popouštění !!! Pro bližší informace viz kapitola o cementaci.

**Nitridace**

Obvyklá teplota procesu se volí v rozmezí 500 až 600 °C. Nitriduje se buďto v kapalném (roztavené kyanidové sole) nebo plynném (částečně disociovaný čpavek) prostředí. Moderním způsobem nitridace je plasmová (iontová) nitridace. Ocel před nitridací se musí zušlechtit. Důležité je rovněž připomenout, že teplota nitridace musí být bezpodmínečně nižší, než teplota popouštění, aby nedošlo k nežádoucímu a nekontrolovatelnému ovlivnění vlastností jádra součásti.
Základní parametry nitridovaných vrstev, které se předepisují na výkresu (v projektu musí být předepsány na začátku technologického postupu) jsou: povrchová tvrdost, případně i tvrdost jádra (po zušlechtění), tloušťka difúzní nitridované vrstvy (obvykle bývá max. 0.3 mm, vytváření tlustších vrstev je neekonomické a proto se v praxi nedělá), vyjádřená kritériem Nht (obvykle odpovídá hloubce, v níž je dosažena tvrdost jádra + 50 HV), popřípadě tloušťka sloučeninové vrstvy nitridu, pokud je vyžadována (v mikrometrech).

Sloučeninová vrstva



Difúzní vrstva

Příklad nitridovaných vrstev na konstrukční zušlechtěné oceli

Podle potřebných parametrů vrstvy se pak volí nitridační prostředí. V případě kapalného prostředí (solné lázně) jsou volitelnými parametry teplota a čas. Tyto se volí většinou na základě zkušeností pracovníků, provádějících tepelné zpracování. U plynného prostředí jsou parametry rovněž teplota a čas, avšak v případě směsi čpavku a produktů jeho štěpení také nitridační číslo. Nitridační číslo vyjadřuje, podobně jako v případě cementace uhlíkový potenciál, schopnost atmosféry sytit povrch oceli dusíkem. Pro zjednodušení lze říci, že s rostoucí teplotou klesá nitridační číslo, protože dochází k rychlejšímu štěpení čpavku na dusík a vodík, které nemají nitridační schopnost, ale naopak, difuzní rychlost s rostoucí teplotou stoupá. Výsledkem je, že vrstvy, vytvořené při vyšší teplotě jsou silnější, ale méně nasycené dusíkem a jejich tvrdost je oproti vrstvám, nitridovaným při nižší teplotě nižší.

Typické tvrdosti a tloušťky vrstev, dosahované u ocelí a litin, jsou uvedeny v tabulce.

| Název oceli (litiny) | Značka | $HV_{0,2}$ | $N_{ht}$ | Sl.vrstva |
|---|---|---|---|---|
| | | | [mm] | [µm] |
| Konstrukční | 11 370 | 150 - 350 | 0,3 - 0,8 | 4 - 10 |
| Uhlíková | 12 050 | 350 - 500 | 0,3 - 0,8 | 4 - 15 |
| Automatová | 11 110 | 200 - 250 | 0,3 - 0,8 | 6 - 10 |
| Litina s kuličkovým grafitem | 42 25XX | 400 - 600 | 0,1 - 0,3 | 5 - 10 |
| Cementační | 14 220 | 550 - 700 | 0,3 - 0,6 | 4 - 8 |
| K zušlechtění | 15 142 | 550 - 650 | 0,2 - 0,6 | 4 - 8 |
| Nitridační | 14 340 | 900 - 1100 | 0,2 - 0,5 | 2 - 10 |
| Pro práci za tepla | 19 554 | 900 - 1150 | 0,1 - 0,3 | 2 - 6 |
| Rychlořezné | 19 830 | 1000-1250 | 0,03-0,1 | ---- |
| Martenziticky vytvrditelné | 19 901 | 850 - 950 | 0,05-0,1 | 2 - 4 |
| Korozivzdorné | 17 246 | 950-1250 | 0,05-0,1 | ---- |

**Karbonitridace:**

Je to vlastně nitridační proces probíhající v prostředí obsahujícím částečně disociovaný čpavek a přídavek 5 - 10 % uhlovodíků (např. propan). V případě ocelí s vyšším obsahem uhlíku (nad 0.4%) se však o karbonitridaci může jednat i tehdy, je-li používáno čistě nitridační atmosféry, protože uhlík do vrstvy difunduje z jádra materiálu a vytváří pak vrstvu karbonitridovanou.

Hlavními parametry karbonitridovaných vrstev, které je nutno předepsat na výkresu (v projektu musí být předepsány na začátku technologického postupu) jsou: Povrchová tvrdost, případně i tvrdost jádra (pokud je před karbonitridací požadováno zušlechtění), tloušťka difuzní karbonitridované vrstvy (obvykle bývá max. 0.3 mm, vytváření tlustších vrstev je neekonomické a proto se v praxi nedělá), vyjádřená kritériem Nht (obvykle odpovídá hloubce, v níž je dosažena tvrdost jádra + 50 HV), a rovněž tloušťka sloučeninové vrstvy karbonitridu (zpravidla tzv. epsilon fáze), protože karbonitridace se provádí zejména za účelem získání kompaktní vrstvy obsahující uvedený karbonitrid. Tloušťka kompaktní sloučeninové vrstvy se uvádí v mikrometrech.
Typická teplota procesu se pohybuje v rozmezí 570 – 620 °C. Při nižší teplotě jsou podobně, jako u nitridace vrstvy lépe nasycené a kompaktnější, při vyšší teplotě jsou vrstvy silnější, avšak obsahují větší množství pórů a jejich adheze na povrchu je horší. Optimální tloušťka sloučeninové vrstvy pro průmyslové aplikace je 10 – 25 μm, rychlost jejího růstu závisí na nitridačním čísle atmosféry, množství přidávaného uhlovodíku a teplotě. Obvykle se rychlost růstu sloučeninové vrstvy udává cca 0.05 mm/2-3 h.

# PŘÍLOHA

**Oceli pro ozubená kola – TZ (CHTZ), pevnost, použití**

| Stav kol po tepelném zpracování | Ocel ČSN | Pevnost jádra Rm [MPa] | Použití (komentář) |
|---|---|---|---|
| Povrchově kalená ozubená kola | 12 051 | 640 - 780 | Podle způsobu povrchového kalení se získává vysoká kontaktní únosnost nebo únavová pevnost v ohybu |
| | 14 140 | 930 - 1130 | |
| | 42 2660 | 610 – 750 | |
| Cementovaná ozubená kola | 12 020 | min. 600 | Kola malých modulů, *vn* Kola malých a středních modulů pro automobily, obráběcí stroje a velkých modulů (ocel tř. 16), *vn* |
| | 14 220 | min. 965 | |
| | 14 223 | min. 1000 | |
| | 16 420 | min. 1000 | |
| Nitrocementovaná ozubená kola | 14 140 | min. 1400 | Kola menších modulů, *vn*, pro automobilový průmysl |
| Nitridovaná ozubená kola | 14 340<br>15 230 | 800 - 950 | Bezdeformační zpracování, *vn* |
| Karbonitridovaná ozubená kola | 12 060 | min. 600 | Kola menších modulů, únosnost větší, než u zušlechtěných |
| | 14 140 | min. 900 | |
| Zušlechtěná ozubená kola | 12 061 | 740 – 880 | Kola pro *sn*, věnce rozměrnějších kol |
| | 13 242 | 880 - 1030 | |
| | 14 140 | 930 – 1130 | |
| Měkká ozubená kola | 11 523 | min. 510 | Rozměrná svařovaná kola pro *nn* |
| | 12 061 | min. 660 | Kola pro *nn* |

*nn*, *sn*, *vn* – nízké, střední a vysoké nároky na únosnost, resp. životnost

**Výběr z ocelí pro ozubená kola**

| Ocel dle ČSN | Ocel dle ČSN EN | Ocel dle ČSN | Ocel dle ČSN EN |
|---|---|---|---|
| **11600 *** | **E 335** | **13241 *** | **37MnSi5** |
| **11700 *** | **E 360** | **14220** | **16MnCr5** |
| **12010 *** | **C10E** | **14240** | **36Mn5** |
| **12020 *** | **C15E** | **14340** | **34CrAl6** |
| **12040 *** | **C35E** | **15241** | **42CrV6** |
| **12050 *** | **C45E** | **15260** | **50CrV4** |
| **12051 *** | **C50E** | **16220** | **15CrNi6** |
| **12060 *** | **C55E** | **16420** | **15NiCr14** |
| **12061 *** | **C60E** | **16440** | **31NiCr14** |
| **13141 *** | **28Mn6** | **16720** | **18NiCrMo16-6** |

* Ocel pro ozubená kola méně vhodná (podmínečné použití)

Poznámka: Oceli tříd 11 a 12 se v moderní výrobě převodových součástí z řady důvodů prakticky nepoužívají. Pro méně namáhané strojní součásti se používají Mn-Cr cementační oceli třídy 14, pro více namáhané převodovky pak oceli třídy 16 s obsahem niklu.

**Mechanické vlastnost vybraných materiálů**

| Označení ČSN | Tepelné nebo chemicko-tepelné zpracování | Tvrdost HV | | Mez únavy [MPa] | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | V jádře zubu | Na boku zubu | V ohybu $\sigma_{Hlimb}$ | V dotyku $\sigma_{Flimb}$ |
| 12 051 | Povrchově kaleno po boku | 200 | 600 - 675 | 390 | 1140 |
| 14 140 | | 250 | 600 - 675 | 450 | 1140 |
| 15 241 | | 315 | 600 - 675 | 528 | 1160 |
| 42 2660 | | 170 | 575 - 650 | 100 | 1120 |
| 15 241 | Povrchově kaleno mezerově | 315 | 600 - 675 | 705 | 1160 |
| 16 343 | | 300 | 600 – 675 | 705 | 1160 |
| 14 340 | Nitridováno**** | 270 | 900 | 580 | 1180 |
| 15 230 | | 250 | 800 | 580 | 1180 |
| 15 330 | | 250 | 800 | 705 | 1180 |
| 16 343 | | 300 | 750 | 730 | 1180 |
| 14 140 *** | Nitrocementováno a kaleno | 485 | 615 – 700 | 740 | 1288 |
| 12 010 | Cementováno a kaleno (Nitrocementováno a kaleno - slabé vrstvy, m ≤ 2) | 135 * | 650 – 720 ** | 500 | 1210 |
| 12 020 | | 150 * | 650 – 720 ** | 500 | 1210 |
| 14 220 | | 250***** | 650 – 720 | 700 | 1270 |
| 16 220 | | 285 | 650 – 720 | 700 | 1270 |
| 16 420 | | 300 | 650 – 720 | 700 | 1270 |
| 12 050 | Zušlechtěno | 200 * | - | 410 | 520 |
| 12 061 | | 235 * | - | 452 | 590 |
| 14 140 | | 285 | - | 512 | 690 |
| 15 241 | | 300 | - | 530 | 720 |
| 16 440 | | 290 | - | 518 | 700 |
| 42 2750 | | 235 | - | 185 | 620 |
| 12 050 | Normalizačně žíháno | 155 | - | 356 | 430 |
| 12 061 | | 200 | - | 410 | 520 |
| 42 2660 | | 170 | - | 155 | 530 |
| 42 2750 | | 190 | - | 165 | 560 |
| 11 500 | Tepelně nezpracováno | 150 | - | 330 | 370 |
| 11 523 | | 155 | - | 336 | 380 |
| 11 700 | | 205 | - | 396 | 480 |
| 42 2425 | + | 240 | - | 45 | 380 |
| 42 2430 | | 260 | - | 50 | 390 |
| 42 2550 | | 200 | - | 120 | 240 |
| 42 2306 | | 230 | - | 135 | 470 |
| 42 2307 | | 250 | - | 135 | 500 |

* Hodnoty tvrdosti, resp. pevnosti jsou pouze orientační, protože u těchto ocelí nelze zaručit jejich prokalení a tím i mechanické vlastnosti v celém průřezu

** Hodnoty tvrdosti na povrchu nemusí být dosažitelné ve větších vsázkách, protože nutná doba manipulace se vsázkou často překračuje kritický čas ochlazování u uhlíkových (nelegovaných) ocelí.

*** Není typický materiál pro nitrocementaci

**** Existují i jiné oceli, určené pro nitridaci, u nichž lze dosáhnout povrchové tvrdosti do 1100 HV

***** Často se předepisují i vyšší tvrdosti a pevnosti jádra, není problém dosáhnout 350 HV do průřezu cca 50 mm

+ Litiny očkované s perlitickou matricí

## Tabulka konečných tlouštěk povrchových vrstev

**Doporučené tloušťky vrstev povrchově tvrzených součástí**

Rozměry v mm

| Základní rozměr[1]) | Tloušťka vrstvy[2]) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | cementované | nitro-cementované | nitridované | povrchově kalené, vysokofrekvenčně, plamenem | |
| 10 | 0,3 až 0,5 | 0,1 až 0,2 | 0,2 až 0,4 | 1 až 2 | |
| 20 | 0,4 až 0,6 | 0,15 až 0,25 | 0,2 až 0,4 | 2 až 3 | |
| 30 | 0,5 až 0,7 | 0,20 až 0,30 | 0,2 až 0,4 | 2 až 3 | |
| 40 | 0,6 až 0,8 | 0,25 až 0,40 | 0,2 až 0,4 | 2 až 3 | |
| 50 | 0,7 až 0,9 | 0,3 až 0,45 | 0,2 až 0,4 | 2 až 3 | |
| 60 až 80 | 0,8 až 1,0 | 0,35 až 0,55 | 0,3 až 0,5 | 3 až 4 | |
| 80 až 100 | 0,9 až 1,1 | 0,4 až 0,65 | 0,3 až 0,5 | | |
| 100 až 150 | 1,1 až 1,3 | 0,45 až 0,7 | 0,3 až 0,5 | 3 až 5 | |
| 150 až 200 | – | [3]) | 0,3 až 0,5 | 3 až 5 | |
| 200 až 300 | – | – | 0,4 až 0,6 | 3 až 6 | |
| přes 300 | – | – | 0,5 až 0,8 | 3 až 6 | |
| Modul | | [5]) | [4]) | bok zubu | pata zubu |
| 0,6 | – | 0,1 až 0,15 | – | – | |
| 0,8 | – | 0,15 až 0,20 | – | – | |
| 1 | 0,3 až 0,5 | 0,2 až 0,25 | 0,25 až 0,35 | – | |
| 2 | 0,4 až 0,6 | 0,15 až 0,25[6]) | 0,2 až 0,35 | – | |
| 3 | 0,5 až 0,7 | 0,3 až 0,5 | 0,25 až 0,40 | 0,8 až 1,1 | 0,4 až 0,6 |
| 4 | 0,6 až 0,8 | 0,3 až 0,5 | 0,30 až 0,45 | 1,0 až 1,3 | 0,6 až 0,8 |
| 5 | 0,7 až 1,0 | 0,4 až 0,7 | 0,35 až 0,50 | 1,2 až 1,5 | 0,8 až 1,0 |
| 6 | 0,8 až 1,1 | 0,4 až 0,7 | 0,45 až 0,60 | 1,4 až 1,7 | 0,8 až 1,0 |
| 7 | 0,9 až 1,2 | – | 0,50 až 0,65 | 1,5 až 1,8 | 0,9 až 1,1 |
| 8 | 1,0 až 1,3 | – | 0,50 až 0,65 | 1,6 až 1,9 | 1,0 až 1,2 |
| 9 | 1,0 až 1,3 | – | 0,50 až 0,65 | 1,7 až 2,0 | 1,0 až 1,2 |
| 10 | 1,0 až 1,3 | – | | 1,8 až 2,1 | 1,0 až 1,2 |

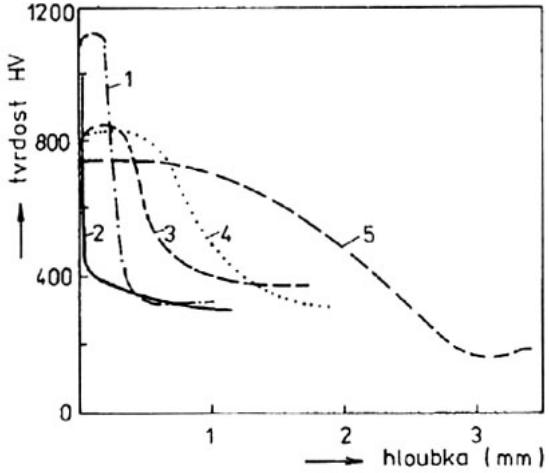
Součásti: [1]) Průměr čepu nebo díry, tloušťka stěny součásti
[2]) Větší tloušťka, nutno volit při menší pevnosti jádra
[3]) Tloušťka > 0,7 mm nevhodná

Ozubená kola: [4]) U zvlášť namáhaných volí se tloušťka o 0,1 až 0,2 větší
[5]) Cementační ocel
[6]) Zušlechtěná ocel 14 140

Optimální obsah C v cement. vrstvě je 0,8 až 1,1 %. Účinná hloubka vrstvy je definována hloubkou, kde tvrdost klesne na určitou hodnotu sjednanou dohodou, např.: u cementační a nitrocementační vrstvy HV = 530, u nitridační vrstvy na HV = 500

## Tvrdosti obvykle dosahované po TZ a CHTZ

| |
|---|
| Povrchové kalení HRC = 45 ÷ 55 (malé moduly m = (3 ÷ 5) – jen boky, větší a velké m ≥ 5 – boky i pata zubu) |
| Cementování a kalení HRC = 58 ÷ 63 |
| Nitridování HV (závisí na materiálu) |
| Iontová nitridace HV (závisí na materiálu) |
| Nitrocementování HRC =57 ÷ 61 |
| Karbonitridování (neuvádí se) |




Závislost tvrdosti *HV* na vzdálenosti od povrchu

1 – po nitridaci, 2 – po karbonitridaci, 3 – po nitrocementaci, 4 – po cementaci, 5 – po povrchovém kalení

## Porovnání tvrdostí

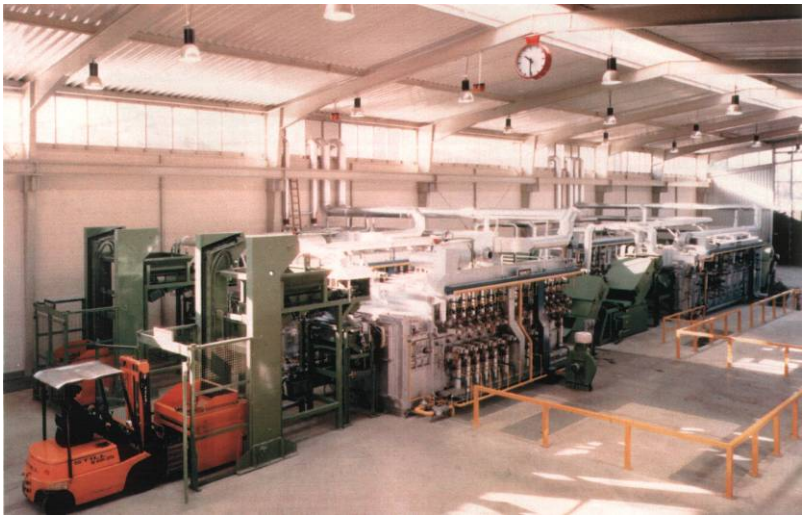
| HV | $R_m$ * [Mpa] | HRC | HBW10 |
|---|---|---|---|
| 150 | 483 | - | 143 |
| 200 | 643 | - | 190 |
| 250 | 803 | 22 | 238 |
| 300 | 964 | 30 | 285 |
| 350 | 1125 | 35,5 | 333 |
| 400 | 1290 | 41 | 380 |
| 450 | 1458 | 45 | 428 |
| 500 | 1630 | 49 | 475 |
| 550 | 1809 | 52 | 523 |
| 600 | | 55 | 570 |
| 650 | | 58 | 618 |
| 700 | | 60 | 655 |
| 750 | | 62 | 701 |
| 800 | | 64 | 746 |
| 850 | | 65,5 | 791 |
| 900 | | 67 | 836 |

* orientační hodnoty pevnosti platí pro ocel
skutečné hodnoty závisí na

Obrázek orientačně ukazuje dosahované tvrdosti v závislosti na hloubce pod povrchem pro vybrané TZ a CHTZ.

**Kola s povrchem tepelně zpracovaným je nutno po tepelném zpracování brousit!**
Výjimkou je pouze iontová nitridace, která nevykazuje zhoršenou kvalitu povrchu po tepelném zpracování a má velmi malou tloušťku tvrzené vrstvy.

Tepelné nebo chemicko tepelné zpracování probíhá v agregátech se složitými regulačními mechanismy, které zaručují bezpečný provoz a dodržení požadovaných parametrů během celého procesu tepelného zpracování.
Zařízení pro malosériové zpracování umožňují variabilní změny podmínek procesu TZ (CHTZ) (řízení teplotních režimů, atmosféry…).
V sériové výrobě se pro tepelné zpracování používá hojně průchozích tunelových pecí vřazených do linek umožňujících produkci v jednoúčelových nebo variabilních programech.



Zavážení vsázky- zboží do pecního agregátu

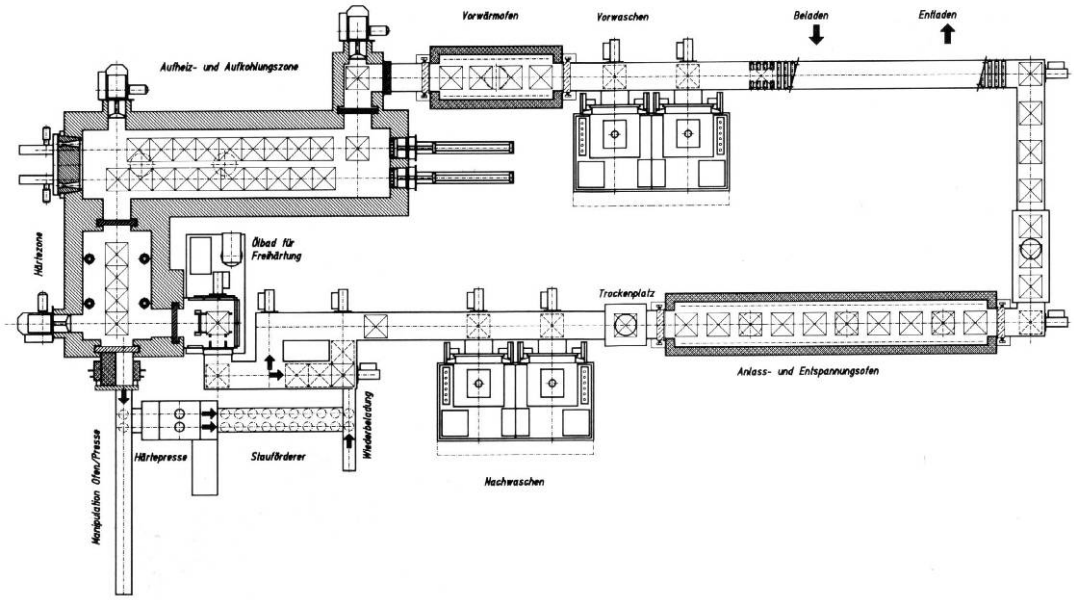
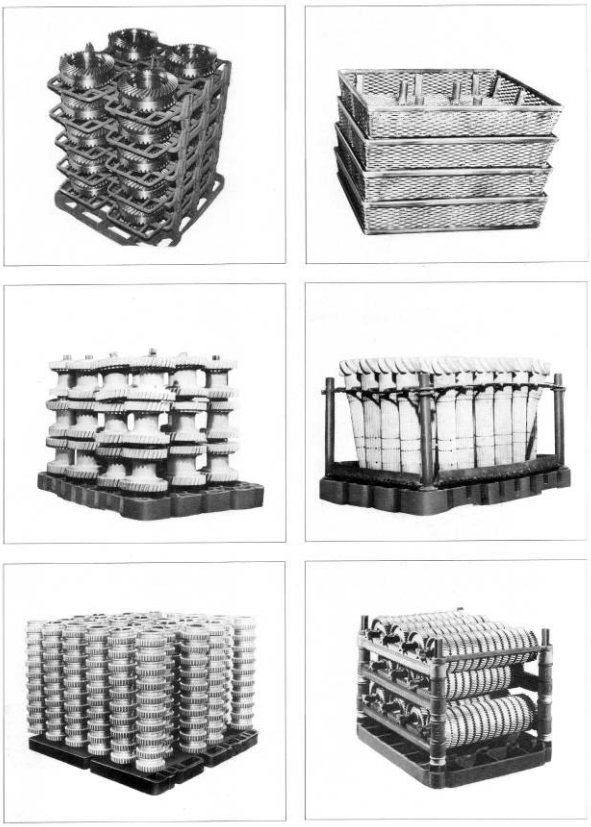
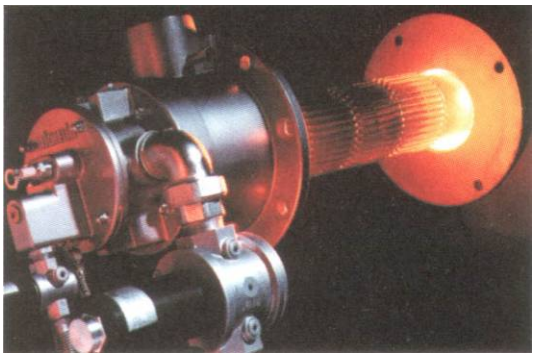



Schéma linky pro tepelné (chemicko-tepelné) zpracování firmy AICHELIN (Rakousko)



Vsázka (zboží) se zásadně ukládá na palety, koše, trny nebo speciální přípravky, které zaručují polohu součástí během procesu TZ (CHTZ) a současně zajistí optimální rozložení zboží vzhledem k přenosu tepla a hmoty (v případě chemicko-tepelného zpracování) v pecním agregátu a během ochlazování (kalení). Zároveň je třeba také dbát na polohu zboží v přípravcích tak, aby bylo minimalizováno riziko deformací nebo praskání zpracovávaných součástí během ochlazování, zejména při kalení.



Doporučované způsoby ponořování výrobků do kalicích lázní

Při povrchovém kalení je tepelně zpracovávána pouze poměrně tenká vrstva materiálu. Po krátkém a intenzivním ohřevu při kterém nesmí dojít k natavení povrchu součásti následuje téměř okamžitě ochlazení sprchou kalícího média (obvykle voda). Na obrázku je pohled na probíhající proces povrchového kalení ozubeného hřídele - zdroj tepla (hořák nebo induktor) je za přírubou vpravo nahoře.

MATERIÁLY PRO ŘETĚZOVÁ KOLA

Pastorky - cementované: 12 020, 12 040, 14 220
Kola – bez TZ nebo NŽ:12 041, 12 051, 11 600, 42 2306, 42 2670, 42 2726

MATERIÁLY PRO ŘEMENICE

42 2415, 42 2420, 422425, slitina hliníku 42 4357 (AlSi5Cu4Zn)

**DOPORUČENÁ LITERATURA:**

Viz Nauka o materiálu I, II
Internetové stránky výrobců pecních zařízení, např. Aichelin, Schmetz, BMI
Internetové stránky výrobců a dodavatelů průmyslových atmosfér: Linde, Air Liquide