



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ANALÝZA VLIVU CHEMICKO-TEPELNÉHO ZPRACOVÁNÍ NA ZMĚNU ROZMĚRŮ

ANALYSIS OF HEAT TREATMENT EFFECT ON DIMENSION SHIFT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Kunkela

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Ladislav Kolář

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Ondřej Kunkela
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Ladislav Kolář
Akademický rok:	2015/16

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

Analýza vlivu chemicko-tepelného zpracování na změnu rozměrů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student provede literární rešerši problematiky chemicko-tepelného zpracování. V praktické části se zaměří na měření rozměrů konkrétní součásti před a pod chemicko-tepelném zpracování a vyhodnotí její rozměrové změny.

Cíle bakalářské práce:

1. Aktuální literární studie
2. Teoretický rozbor problematiky
3. Experimentální měření
4. Vyhodnocení získaných dat
5. Závěry

Seznam literatury:

Ptáček, L. (2002): Nauka o materiálu. II. 2. opr. a rozš. vyd. CERM, Brno

Hazlinger, M., Moravčík R. (2013): Chemicko-tepelné spracovanie materiálov. STU

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na chemicko-tepelné zpracování oceli, a to zejména na změnu rozměrů vzniklou během procesu. Za účelem bližšího prozkoumání problematiky byly vyrobeny vzorky z různých materiálů a o různých rozměrech. Vzorky byly následně změřeny před a po iontové nitridaci. Obdobně jako vzorky byly měřeny i skutečné kusy, z nichž některé byly iontově nitridované a některé cementované. Tyto skutečné kusy byly vyrobeny ze stejného materiálu, ale rozměrově a tvarem se od sebe lišily. Následně byla všechna data zpracována a vyhodnocena.

Klíčová slova

Chemicko-tepelné zpracování oceli, nitridace, cementace, změna rozměrů.

ABSTRACT

This bachelor thesis focuses on chemical-heat steel processing, mainly to the size change caused by the process itself. To look into the problem closely some samples from various materials and of various size have been made. The samples were measured before and after the ionic nitridation. Likewise the samples, the real pieces were measured, some of them were ionic nitridated and some were cemented. The real pieces were made from the same material but they differed in size and shape. Subsequently, all the figures were processed and assessed.

Key words

Chemical heat treatment of steels, nitriding, cementation, dimension shift.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUNKELA, Ondřej. *Analýza vlivu chemicko-tepelného zpracování na změnu rozměrů*. Brno 2016. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 46 s. 14 příloh. Vedoucí práce Ing. Ladislav Kolář.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma: „**Analýza vlivu chemicko-tepelného zpracování na změnu rozměrů**“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

19.05.2016

Datum

Ondřej Kunkela

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu své bakalářské práce panu Ing. Ladislavu Kolářovi za jeho cenné rady a připomínky.

Dále bych chtěl poděkovat firmě Bosch Diesel s.r.o., která mi vypracování bakalářské práce umožnila. Především konzultantu Ing. Jiřímu Doležalovi za jeho odbornou pomoc a cenné rady.

V neposlední řadě patří můj dík mé rodině a přátelům za podporu během celého studia.

OBSAH

ÚVOD	8
1 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ.....	9
1.1 Podstata chemicko-tepelného zpracování	9
1.2 Dílčí procesy chemicko-tepelného zpracování	9
1.2.1 Adsorpce	9
1.2.2 Disociace.....	9
1.2.3 Absorpce	10
1.2.4 Difuze.....	10
1.3 Rozdělení druhů chemicko-tepelného zpracování	12
1.4 Druhy chemicko-tepelného zpracování	12
1.4.1 Cementace.....	12
1.4.2 Karbonitridování a nitrocementování	15
1.4.3 Sulfonitridace	16
1.4.4 Boridování	16
1.4.5 Difuzní hliníkování (alitování)	18
1.4.6 Difuzní chromování (inchromování)	18
1.4.7 Difuzní křemíkování	19
1.4.8 Nitridace.....	19
2 PRAKTICKÁ ČÁST	28
2.1 Vzorky	28
2.1.1 Použité materiály	28
2.1.2 Výroba vzorků	29
2.1.3 Druh použité nitridace	31
2.2 Měření	31
2.2.1 Válečky	34
2.2.2 Kroužky	37
2.2.3 Skutečné kusy	40
3 DISKUZE	42
3.1 Vzorky	42
3.2 Skutečné kusy	43
ZÁVĚR.....	44
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	45

ÚVOD

Procesy chemicko-tepelného zpracování oceli jsou významnou povrchovou úpravou materiálů. U součástí dochází k nasycování povrchu různými prvky podle druhu chemicko-tepelného zpracování. To vede k vytvoření tvrdé povrchové vrstvy při zachování houževnatého jádra. Nově vzniklá vrstva vykazuje vysokou tvrdost, velmi dobrou odolnost proti otěru, opotřebení a korozi. I přes všechny tyto kladné vlastnosti mají procesy chemicko-tepelného zpracování zásadní nevýhodu, kterou je změna rozměrů. Tato změna rozměrů je způsobena vlivem působení vysokých teplot a sycení povrchu během procesu chemicko-tepelného zpracování.

Cílem této bakalářské práce je tuto změnu rozměrů blíže prozkoumat. V praktické části proto byly vyrobeny z nejčastěji používaných materiálů vzorky, které byly změřeny před a po iontové nitridaci. Jako vzorky byly použity válečky (18 kusů) a kroužky (18 kusů). Válečky byly vyrobeny o stejné délce, ale jiném průměru. Kroužky byly vyrobeny také o stejné délce, ale jiném průměru. Měření pak dále probíhalo i na skutečných kusech, které se od sebe lišily tvarem a rozměrem. Skutečné kusy byly nitridovány i cementovány.

1 CHEMICKO-TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ

1.1 Podstata chemicko-tepelného zpracování

Chemicko-tepelným zpracováním oceli jsou myšleny procesy, při kterých u součástí dochází k nasycování povrchové vrstvy různými prvky. Působením chemického prostředí a zvýšených teplot nastává u materiálu změna chemického složení. Těmito procesy se dosahuje rozdílných mechanických a fyzikálních vlastností jádra a povrchu součástí. Zpravidla tedy u součástí dochází ke zvýšení tvrdosti povrchu při zachování houževnatého jádra. Těchto požadovaných vlastností lze dosáhnout buď přímo, tj. sycením povrchové vrstvy daným prvkem za zvýšených teplot a následným pomalým ochlazením, nebo nepřímo, kdy dochází k nasycení povrchové vrstvy a následnému tepelnému zpracování (kalení a nízkoteplotnímu popouštění) [1 - 3].

1.2 Dílčí procesy chemicko-tepelného zpracování

Chemicko-tepelné zpracování probíhá ve čtyřech dílčích pochodech. Jednotlivé pochody jsou:

1. adsorpce – vzájemná interakce mezi povrchem a molekulami sloučeniny,
2. disociace – rozklad molekul (vznik aktivních atomů),
3. absorpce – pohlcení atomů povrchem,
4. difuze – pohyb atomů z povrchu do difuzní vrstvy.

Intenzita těchto pochodů je závislá na druhu oceli, chemickém složení a aktivitě prostředí, teplotě sycení a na druhu prvku, kterým je povrch sycen. Pro prostředí jsou plynná, kapalná nebo tuhá [1 - 4].

1.2.1 Adsorpce

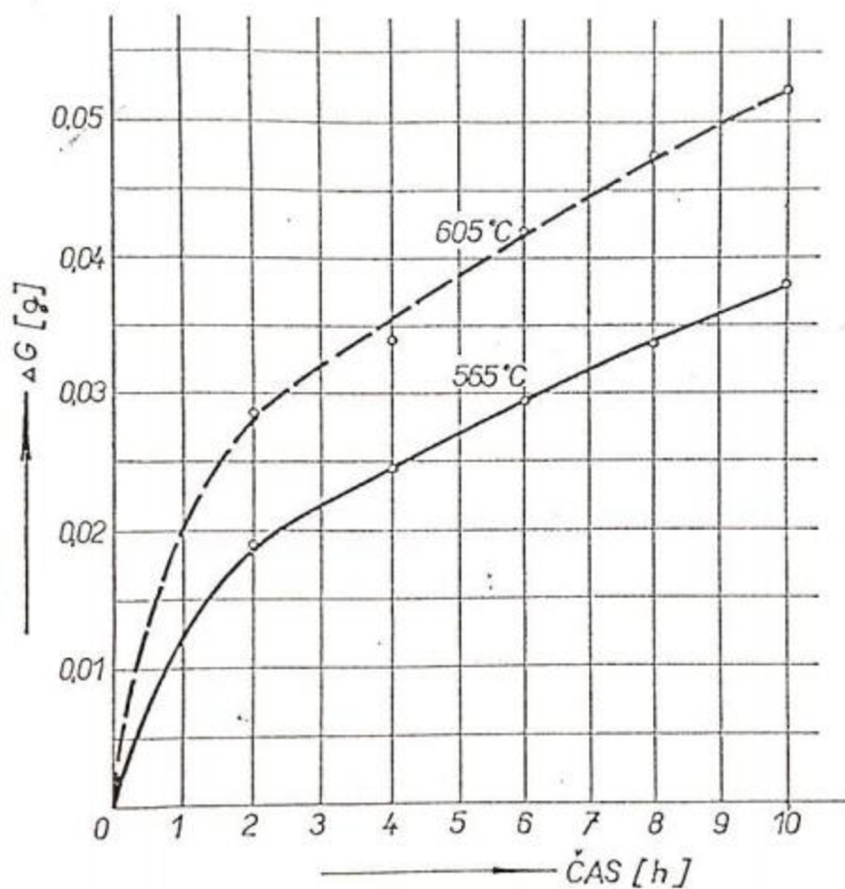
V tomto procesu dochází ke slabé interakci mezi povrchem a molekulami chemických sloučenin. Adsorpce je silně závislá na stavu adsorpčního povrchu. Tento děj neprobíhá na celém povrchu součástí, ale pouze na aktivních místech. Velký vliv na adsorpci má oxidace a znečištění povrchu, které mohou snížit počet aktivních míst, a tím i celkovou rychlost růstu difuzní vrstvy, popř. mohou způsobit různorodost hloubky. Zvýšit počet aktivních ploch lze vhodnou mechanickou, chemickou nebo fyzikální úpravou [1, 4].

1.2.2 Disociace

Během disociace dochází ke vzniku aktivních atomů vlivem rozkladu molekul chemických sloučenin. Disociace se řídí známými zákony chemických reakcí, a to zejména Guldberg-Waagovým zákonem. Podstatou tohoto zákonu je, že všechny reakce směřují k rovnovážnému stavu, ve kterém je poměr součinu koncentrace látek vstupujících do reakce a součinu látek vznikajících během reakce stejný. Jedná se tedy o rovnovážnou konstantu chemické reakce, která se s teplotou a tlakem mění. Rychlost chemické reakce za určité teploty a tlaku závisí na koncentraci regulované látky. Reakční rychlost je při vysoké koncentraci nejvyšší, čím více se koncentrace blíží k rovnovážnému stavu, tím je rychlost pomalejší [1, 4].

1.2.3 Absorpce

Při procesu absorpce je povrchem pohlcena pouze malá část atomů vzniklých disociací molekul na povrchu součásti. Absorpce v závislosti na čase vykazuje parabolický průběh (viz obr. 1.1). Z tohoto důvodu se v některých případech může stát, že při snaze dosáhnout určité hloubky za delší čas, dojde k přesycení povrchu, což má negativní vliv na kvalitu povrchu. Na rychlost růstu difuzní vrstvy má zásadní vliv koncentrace absorbovaných atomů. Z tohoto důvodu probíhají procesy chemicko-tepelného zpracování v dnešní době za takových podmínek, aby byla aktivita a koncentrace absorbovaných atomů co největší [1, 4].



Obr. 1.1 Závislost množství absorbovaného dusíku na čase nasycování při teplotě 565 a 605 °C u oceli 15 330 v atmosféře NH_3 [4].

1.2.4 Difuze

Pohyby absorbovaných atomů základním materiálem vyplývají z difuzních zákonů. Difuzi lze definovat jako přenosový děj, ve kterém u základního materiálu dochází k přemísťování látky. Toto přemísťování probíhá od místa s vyšší koncentrací látky do místa s nižší koncentrací látky (koncentrační spád). Podle mechanismu, jakým probíhá, lze koncentrační spád rozdělit do dvou hlavních skupin – difuzi vakantní a intersticiální. Difuzi ovlivňuje hned několik faktorů, jako je teplota, krystalická mřížka a vazba mezi atomy. Z důvodů vyšší frekvence kmitání atomů kolem svých uzlových bodů probíhá difuze rychleji a snadněji za vyšších teplot. Na volném povrchu probíhá difuze rychleji než v krystalografické struktuře, protože k pohybu atomu v krystalické mřížce je potřeba větší

množství energie. K popisu difuze z fenomenologického hlediska se používají Fickovy zákony[4].

První Fickův zákon je platný jen pro stacionární difuzi. Z toho vyplývá, že koncentrace difundující látky se s časem nemění, $\frac{\partial c}{\partial t} = 0$. První Fickův zákon zní následovně:

$$J = -D \cdot \frac{\partial c}{\partial x}$$

kde: J [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$] – difuzní tok

D [$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$] – celkový koeficient difuze

$\frac{\partial c}{\partial x}$ [$\text{mol} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{m}^{-1}$] – gradient koncentrace

Z prvního Fickova zákona vyplývá, že J a $\frac{\partial c}{\partial x}$ mají opačný směr, to znamená, že se atomy přesouvají z míst s vyšší koncentrací do míst s nižší koncentrací atomů. V některých případech může docházet k tomu, že J a $\frac{\partial c}{\partial x}$ mají stejný směr, to vede k tomu, že se bude koncentrační rozdíl zvyšovat [4].

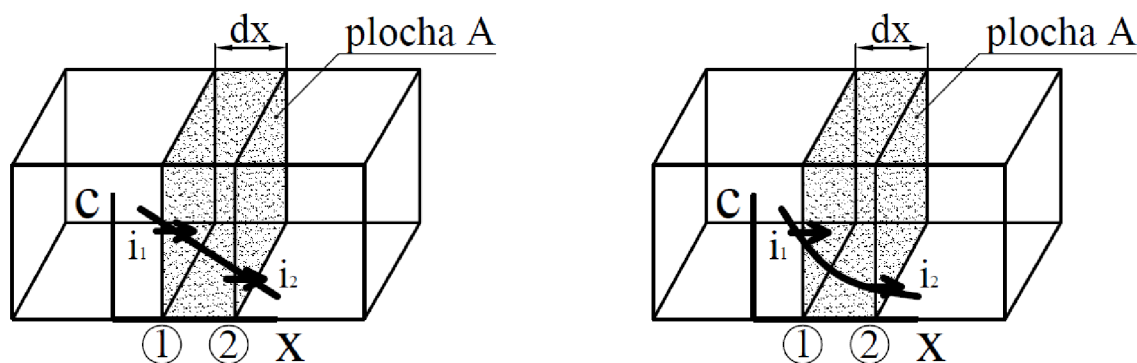
První Fickův zákon platí pouze v případě, že se koncentrace difundující látky v čase nemění. Pokud však dochází k její změně v čase, nastává difuze nestacionární, v tom případě se vychází z druhého Fickova zákona, který zní následovně:

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

kde: $\frac{\partial c}{\partial \tau}$ - je změna koncentrace v závislosti na čase rychlosti změny koncentrace

$\frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$ - je křivost v místě x koncentračního profilu

Schéma jednotlivých způsobů difuze je zobrazeno na obr. 1.2 [4].



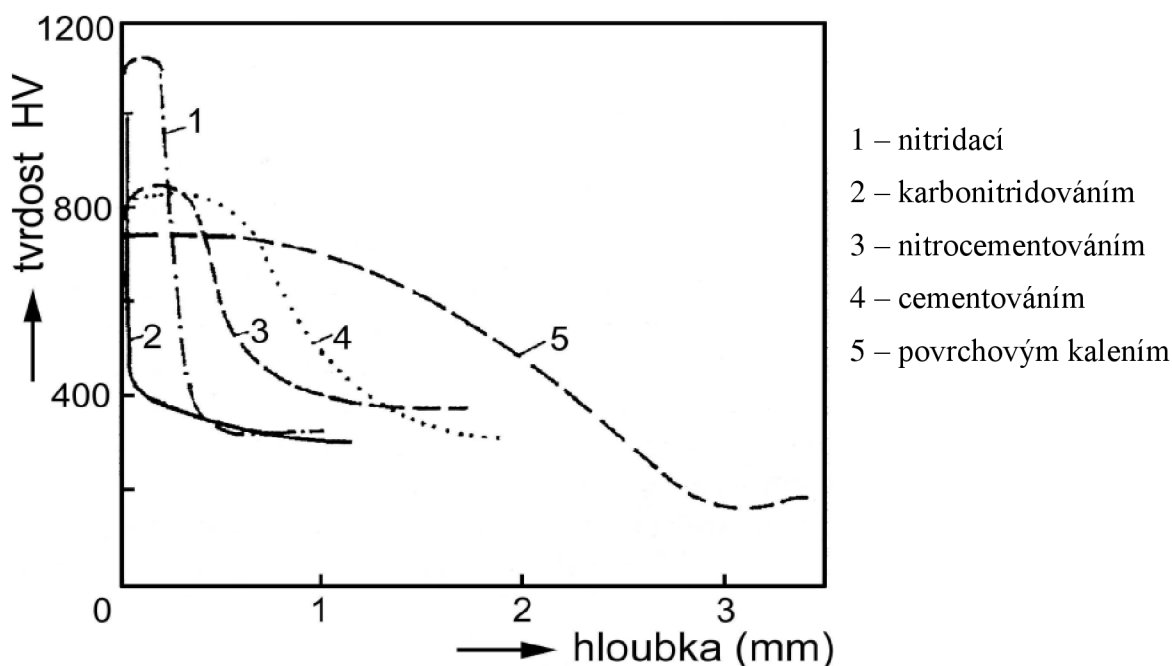
Obr. 1.2 Schéma nestacionární (vpravo) a stacionární (vlevo) difuze [4].

1.3 Rozdělení druhů chemicko-tepelného zpracování

Metody chemicko-tepelného zpracování lze rozdělit podle difundujících prvků, které se během procesu používají. Podle prvku použitého při chemicko-tepelném zpracování lze rozdělit metody následovně:

- nitridace (N),
- cementace (C),
- karbonitridace a nitrocementace (N a C),
- sulfonitridace (N a S),
- boridování (B),
- difuzní hliníkování (Al),
- difuzní křemíkování (Si),
- difuzní chromování (Cr) [4].

Jednotlivé metody se užívají v závislosti na využití a požadovaných vlastnostech součástí. Použitím jednotlivých metod se dosahuje jiných vlastností povrchu. Proto lze u různých druhů chemicko-tepelného zpracování, jako je cementace, nitridace, nitrocementace a karbonitridace, pozorovat rozdílné tvrdosti a hloubky dosahovaných vrstev [2, 3]. Tyto rozdíly jsou zobrazeny v obr. 1.2.



Obr. 1.2 Závislost tvrdosti HV a dosahovaných hloubek pro jednotlivé druhy chemicko-tepelného zpracování [3].

1.4 Druhy chemicko-tepelného zpracování

1.4.1 Cementace

Cementace je proces, při kterém se povrch dané součásti sytí uhlíkem na eutektoidní, popř. lehce nadeutektoidní koncentraci (obvykle 0,8 – 1 hm. % uhlíku)

za teplot mezi 850 až 950 °C. Cementace se provádí za účelem vytvoření pevné povrchové vrstvy při zachování houževnatého jádra. Požadovaných vlastností, jako je vysoká tvrdost povrchu, odolnost proti opotřebení a únavovému namáhání, je dosaženo následným dokončovacím tepelným zpracováním (martenzitickým kalením a popouštěním při nízkých teplotách) [1- 3].

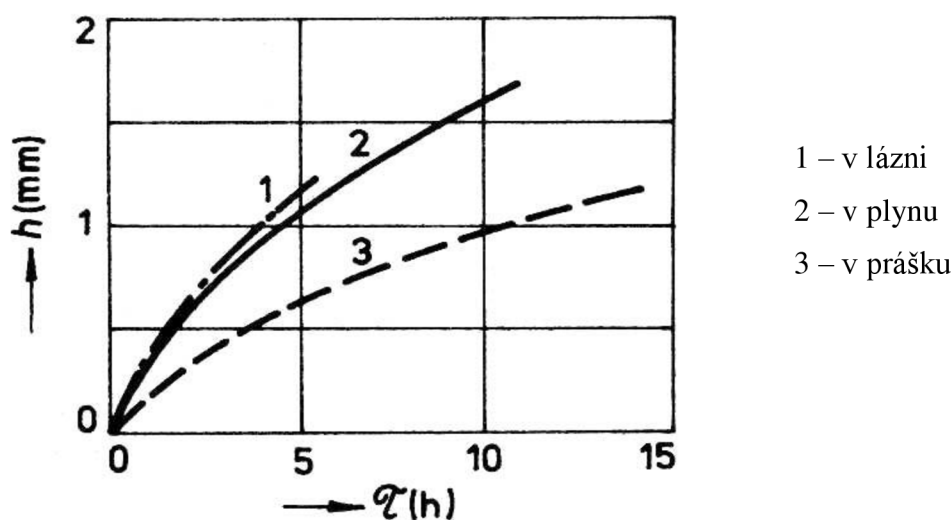
Při procesu chemicko-tepelného a dokončovacího tepelného zpracování často dochází k nežádoucí změně tvaru součástky (deformace). Tato změna závisí na tvaru součástky a velikosti makroplastických napětí v průběhu překonávání teplotních změn. Z tohoto důvodu se na součást předepisuje přídavek na broušení (0,05 - 0,25 mm), který zaručuje správnost rozměrů. Po odbroušení však musí být zachovány požadované vlastnosti [1, 4].

Mechanické vlastnosti zásadně ovlivňuje obsah uhlíku v povrchové vrstvě. Ideální obsah uhlíku v povrchové vrstvě cementované součásti se pohybuje v rozmezí mezi 0,75 až 1,1 % C. Se zvyšujícím se obsahem uhlíku klesá mez pevnosti v ohybu a v krutu, dále klesá zhruba o 20 % vrubová houževnatost [1].

Hloubka cementované vrstvy se odvíjí od toho, jak bude součást namáhána, od konstrukčního řešení a dále také od velikosti součásti. Nejčastěji dosahuje hodnot mezi 0,5 až 1,5 mm. Podle tloušťky lze rozdělit cementační vrstvy do tří skupin:

- tenká (do 0,5 mm),
- střední (do 1,5 mm),
- silná (nad 1,5 mm) [2, 4].

Cementaci lze provádět v kapalném, plynném a pevném prostředí. Jednotlivé prostředí se od sebe liší tzv. uhlíkovým potenciálem, což je schopnost sycení daného cementačního prostředí. Na obr. 1.3 je zobrazena závislost hloubky cementační vrstvy na době cementace v jednotlivých prostředích [1, 2].



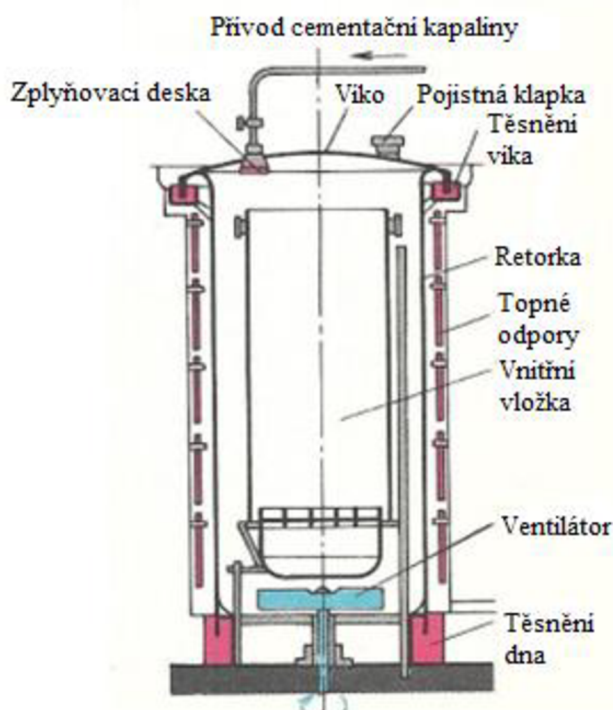
Obr. 1.3 Závislost hloubky cementační vrstvy na době cementace [5].

Při cementaci v pevném prostředí jsou součásti zasypány v uzavřených krabicích směsí dřevěného uhlí o průměru zrn 2 až 9 mm a katalyzátoru (BaCO_3). Proces probíhá

za teploty okolo 920 až 930 °C po dobu 6,5 hodiny a dosahuje se při něm hloubky vrstvy zhruba 0,9 mm. Z důvodu dobrých tepelně-izolačních vlastností cementačních prášků je ohřev a následné ochlazení vsázky velice zdoluhavé. Tento způsob cementace se používá pro menší a jednoduché součásti [1, 2, 4].

Cementování v plynném prostředí probíhá ve směsi, která se skládá převážně z oxidu uhličitého (CO_2) a uhlovodíků (CH_4 , C_4H_{10} , C_3H_8). Tento způsob umožňuje regulovat atmosféru a zvyšovat či snižovat uhlíkový potenciál atmosféry. Atmosféra se přivádí do pece při teplotě 910 až 930 °C. Doba procesu se pohybuje okolo 4 až 6 hodin. Nejčastěji probíhá proces v pecích typu MONOCARB (viz obr. 1.4). Tyto pece umožňují hned po cementaci danou součást zakalit [4].

Cementace v lázních probíhá v roztavených směsích 78 – 85 % Na_2Cl_3 , popř. K_2CO_3 , 10 – 15 % NaCl , 6 – 8 % SiC . Jedná se o rychlou metodu, při níž dochází k rovnoměrnému nauhličení vrstvy po celém povrchu součásti. V praxi však cementace v lázních není rozšířena a upřednostňují se jiné způsoby cementace [1, 4].



Obr. 1.4 Schéma cementační pece typu MONOCARB [4].

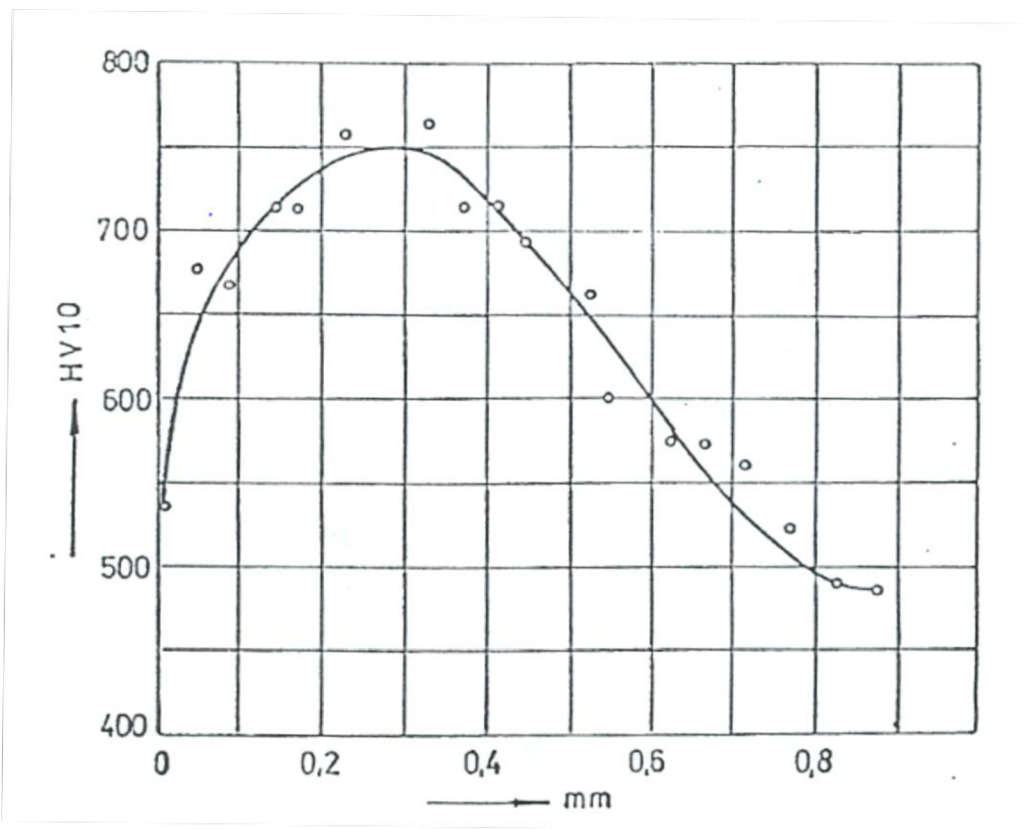
Tepelné zpracování cementačních ocelí lze rozdělit do dvou skupin:

1. Tepelné zpracování před cementací - cílem tohoto tepelného zpracování je zajištění dobré obrobiteľnosti pro třískové obrábění. Součásti se proto anizotermicky zušlechťují (kalí a popouští, nebo normalizačně žíhají).
2. Tepelné zpracování po cementaci - toto tepelné zpracování se používá v případě, že je potřeba část cementované vrstvy odstranit. Jedním z důvodů může být např. vytvoření závitu, u kterého je nežádoucí, aby byl jeho profil cementován. Z tohoto důvodu se tepelné zpracování za účelem dosažení konečných vlastností provádí, až když je součást zcela obrobena [1].

1.4.2 Karbonitridování a nitrocementování

V obou těchto metodách, které se liší teplotou pochodu, dochází k sycení povrchu součásti uhlíkem a dusíkem. Rozdílná teplota pochodu má však za následek rozdílné obsahy uhlíku a dusíku v povrchové vrstvě, a tím i způsoby vytvrzení povrchu [2, 4].

Nitrocementování probíhá při teplotách nad 800 °C, obvykle se teploty pohybují v rozmezí 840 až 860 °C. V atmosféře tvořené směsí uhlovodíků a čpavku je dosaženo hloubky vrstvy 0,3 až 0,4 mm za dobu 1 až 2 hodin. V případě použití kapalné lázně (solné lázně s přísadou kyanidu) je doba procesu kratší (do 1 hodiny) a hloubka vrstvy bývá do 0,2 mm. Oceli k nitrocementování se po nitrocementování kalí a popouští při teplotě 180 °C po dobu 1 až 2 hodin. Tvrdost vrstvy dosažené nitrocementováním (700 až 800 HV) je nižší než při cementování, ta je však kompenzována vyšší pevností jádra z důvodu vyššího obsahu uhlíku v oceli a kratší doby sycení povrchu. Průběh tvrdosti HV nitrocementační vrstvy po kalení je zobrazen v grafu obr. 1.5 [1, 2].



Obr. 1.5 Průběh tvrdosti HV nitrocementační vrstvy v závislosti na vzdálenosti[1].

Karbonitridování probíhá nejčastěji v atmosférách tvořených směsí čpavku s přídavkem uhlovodíků, a to při teplotách okolo 600 až 630 °C. Doba trvání procesu se pohybuje přibližně kolem 4 hodin. Cílem karbonitridace je vytvoření souvislé povrchové vrstvy karbidů, která má velice dobrou odolnost vůči odírání a zadírání. Tloušťka vrstvy je přibližně 0,05 mm a dosahuje se zde tvrdosti až 1 000 HV. Těchto vlastností se využívá u řezných nástrojů, lisovadel, nástrojů na protlačování atd. Karbonitridované součásti mají oproti nitrocementovaným součástem menší deformace, a tudíž je není potřeba kalit [1, 2].

1.4.3 Sulfonitridace

Sulfonitridace je proces, při kterém dochází k nasycování povrchu součásti dusíkem a sírou. Sulfonitridace probíhá buď v plynném prostředí, nebo v solných lázních. V případě plynného prostředí k nasycování dochází při teplotách 580 až 610 °C po dobu 2 až 3 hodin ve směsi amoniaku a sirovodíku. Nejprve je však nutné za pomoci atmosféry složené pouze z amoniaku ohřát součást na nasycovací teplotu, až poté se přivádí do pece sulfonitridační atmosféra. V případě, že se jedná o sulfonitridaci v solných lázních, dochází k nasycování povrchu při teplotách 560 až 590 °C po dobu 30 minut až 3 hodin, nejčastěji však okolo 1 hodiny. Zde se používá lázeň roztavených solí kyanidu, kyanatanů a siřičitanu sodného s přídavkem kyslíku, dusíku, uhlíku a síry [1, 4].

Účelem tohoto procesu je zlepšení kluzných vlastností a odolnosti proti zadírání při tření za sucha. Sulfonitridovaný povrch si zachovává dobré kluzné vlastnosti i v případě, že hloubka opotřebení přesáhne hloubku sulfonitridované vrstvy. To je způsobeno tím, že se sulfonitridovaný povrch ohřívá na vysoké teploty vlivem tření, a sulfonitridovaná vrstva se difuzně přesouvá směrem od povrchu k jádru. Dosahovaná tloušťka vrstvy u tohoto druhu chemicko-tepelného zpracování je okolo 10^{-3} až 10^{-2} mm [1, 2, 4].

Díky dobrým vlastnostem se sulfonitridování používá např. u kluzných ložisek (úspěšně nahrazují bronzové kluzné pouzdra) a řezacích nástrojů [1, 4].

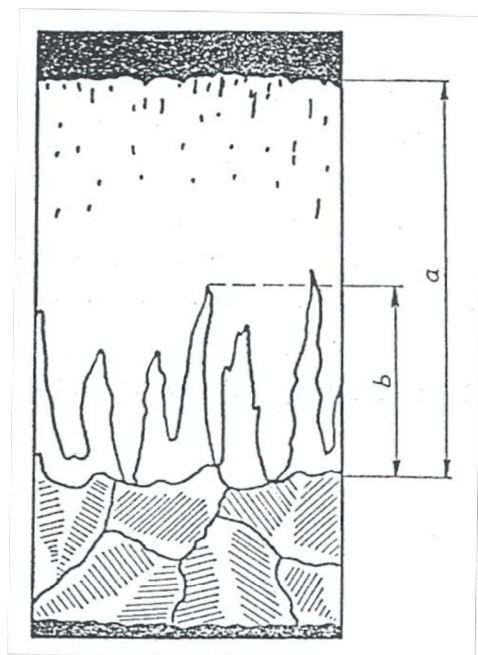
1.4.4 Boridování

Boridování spočívá v nasycování povrchu součásti borem. Tímto nasycováním dochází k zvýšení tvrdosti povrchu, odolnosti proti opotřebení při tření (abrazivním, kluzným a za zvýšených teplot) a zvýšení žáruvzdornosti v porovnání s neboridovanou ocelí. Proces probíhá po dobu 3 až 6 hodin při teplotách 800 až 1050 °C, hloubka vrstvy při těchto podmínkách dosahuje 0,1 až 0,3 mm. Tato vrstva také vykazuje velmi dobrou tvrdost, okolo 2000 HV a to až do teplot 900 až 950 °C. Boridování probíhá buď v práškových směsích, které se skládají z 60 % amorfního boru, karbidu boru, popřípadě feroboru, mletého šamotu a 2 – 4 % NH_4Cl . Dále lze boridovat v plynných směsích, jako je směs $\text{B}_2\text{H}_6 + \text{H}_2$ a směs $\text{BCl}_3 + \text{H}_2$. Tato metoda má však zásadní nevýhodu, a tou je výbušnost plynných směsí v kontaktu se vzduchem. Nejčastěji používanou metodou je boridování v solných koupelích [1, 4].

Nejvýhodnější metodou boridování je boridování v solných koupelích za současného působení elektrolýzy. Účinkem elektrolýzy dochází k vyšší rychlosti růstu vrstvy, a to zhruba o 25 % ve srovnání se stejnými podmínkami procesu, ale bez použití elektrolýzy. Během tohoto procesu vzniká redukci boraxu sodíkem aktivní bor [1, 4].

Během elektrolytického boridování jsou součástky připojené jako katody na zdroj stejnosměrného proudu o napětí 6 až 24 V a anoda (grafitová elektroda) je ponořena do koupele. Teplotu této koupele je nutno udržovat v rozmezí 900 až 950 °C. Hustota proudu dopadající na povrch katod dosahuje 0,20 až 0,24 $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$. Doba nasycování bývá obvykle okolo 2 až 4 hodin a hloubka boridované vrstvy dosahuje 0,1 až 0,3 mm [1, 4].

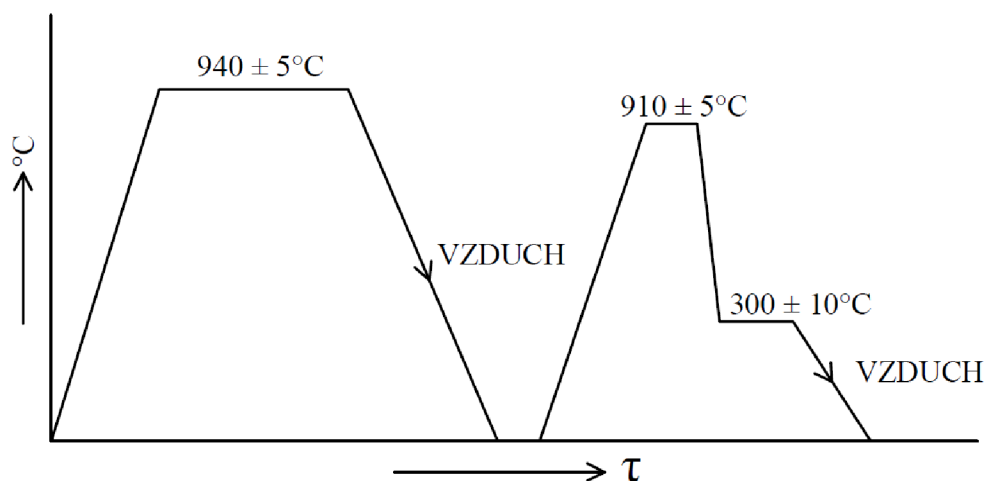
Elektrolytickým boridováním se součástky ohřívají odporovým teplem na teplotu o 20 až 30 °C vyšší než je teplota boridovací koupele. Toto zvyšování teplot povrchu však nesmí přesáhnout 1100 °C. Při jeho přesažení hrozí natavení boridového eutektika. Z těchto důvodů je důležité dodržovat hustotu proudu na povrchu katod a teplotu koupele přesně v předepsaném rozmezí. U vrstev vzniklých boridováním se vyhodnocuje hloubka vrstvy α fáze a celková hloubka vrstvy. Tato hloubka vrstvy je zobrazena na obr. 1.6 [1].



- a - celková hloubka vrstvy
- b – průměrná hloubka vrstvy α fáze

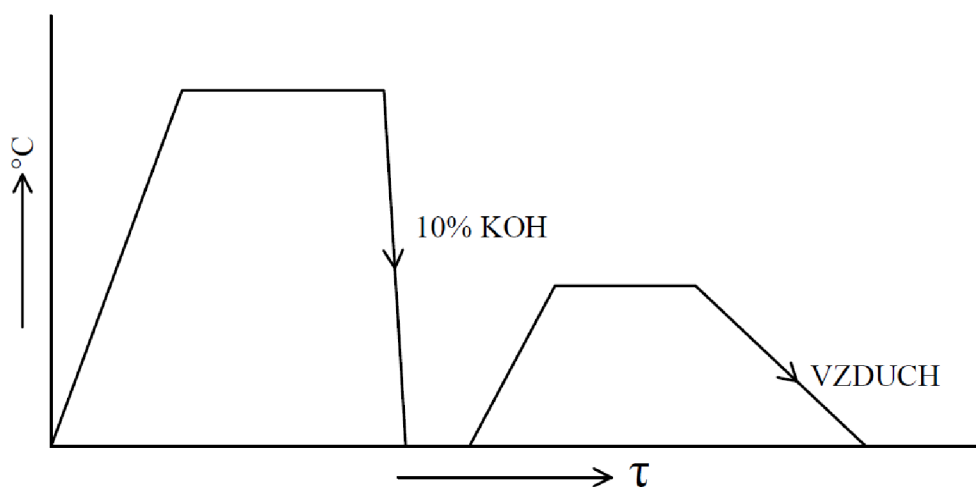
Obr. 1.6 Hloubka boridované vrstvy [1].

Po skončení elektrolytického boridování je povrch pokryt hustou vrstvou usazenin vzniklou vlivem koupele. Z tohoto důvodu je potřeba součást dále tepelně zpracovat. Jako tepelné zpracování se provádí austenitizace a bainitické izotermické kalení, nejprve se však povrch součásti ochladí z boridovací teploty a očistí se od usazenin. Tento způsob není úplně ideální, dochází zde totiž k občasnému odpraskávání boridované vrstvy, pravděpodobně vlivem ohřevu na teplotu austenitizace. Proces je zobrazen na obr. 1.7 [1].



Obr. 1.7 Proces tepelného zpracování (austenitizace a bainitické izotermické kalení) po boridování [1].

Mnohem lepších výsledků lze dosáhnout tím, že se povrch zbaví usazenin změnou polarity povrchu v posledních 5 až 30 minutách procesu boridování. Následně se součást kalí v 10 až 40% vodním roztoku KOH nebo NaOH a popouští na žádanou hodnotu pevnosti jádra. Touto metodou je dosaženo stejných mechanických vlastností jako opakovanou austenitizací, nedochází zde však u boridované vrstvy k porušování její celistvosti. Proces kalení a popouštění je zobrazen na obr. 1.8 [1].



Obr. 1.8 Proces tepelného zpracování (kalení a popouštění) po boridování [1].

1.4.5 Difuzní hliníkování (alitování)

Alitování je proces, při kterém dochází k nasycování součásti povrchu hliníkem. Účelem tohoto chemicko-tepelného zpracování je zvýšení žáruvzdornosti a odolnosti proti atmosférické korozi. Alitují se nízkouhlíkové oceli, které nahrazují vysokolegované žáruvzdorné oceli, dále se za účelem zvýšení žáruvzdornosti alitují také žáruvzdorné a žárupevné oceli. Proces probíhá 0,5 až 6 hodin, při teplotách okolo 700 až 1100 °C, přičemž se dosahuje hloubky vrstvy 0,02 až 8 mm s obsahem hliníku 32 až 34 %. Alitování probíhá v hliníkových koupelích, práškových směsích a metalizací hliníku spojenou s difuzním žiháním [1].

Alitování v hliníkových koupelích (8 až 12 % Fe) probíhá po dobu 1 hodiny při teplotách 680 až 800 °C. Alitováním se dosahuje hloubky vrstvy přibližně 0,3 mm. Hloubku vrstvy lze zvýšit až na hodnotu 0,45 mm následným difuzním žiháním ve vzdušné peci při teplotě 1000 °C [1].

Alitování v prášku se provádí ve směsích, kde aktivní složkou je hliníkový prášek, popř. ferroaluminium, další složkou je kysličník uhličitý, který zabraňuje spékání aktivní složky, a NH_4Cl [1].

Další způsob alitování spočívá v nanášení (nastříkání) vrstvy 0,7 až 1,2 mm hliníku na čistý povrch součásti, předehřevu součásti na 600 °C, následném difuzním žihání při teplotách 900 až 950 °C po dobu 2 až 4 hodin a konečném ochlazení v peci na 600 °C a poté na vzduchu. Hloubka vrstvy vzniklá tímto druhem alitování dosahuje 0,2 až 0,4 mm [1, 4].

1.4.6 Difuzní chromování (inchromování)

Difuzní chromování je metoda chemicko-tepelného zpracování, při které dochází k nasycování povrchu součásti chromem. Stejně jako u alitování se difuzní chromování provádí za účelem zvýšení žáruvzdornosti a odolnosti proti korozi. Proces difuzního chromování trvá okolo 6 až 12 hodin při teplotách 900 až 1200 °C. Při tomto procesu u oceli o obsahu uhlíku 0,4 % vzniká povrchová vrstva karbidů chromu (o hloubce 0,01 až 0,03 mm) vlivem difuze uhlíku směrem k povrchu. Pod touto vrstvou se nachází vrstva α fáze (tuhého roztoku chromu a železa α), která dosahuje hloubky 0,08 až 0,15 mm. Difuzní chromování probíhá v práškových směsích, solných koupelích a plynech [1, 4].

Chromování v práškových směsích probíhá v plynotěsných krabicích, kde jsou součásti zasypány směsí. Prášková směs je složena z ferochromu, kovového chromu, popř. kaolínu, který zabraňuje spékání směsi a NH_4Cl [1].

Chromování v plynech probíhá odděleně, tzn. součást a prášková směs je od sebe navzájem oddělena. Princip spočívá v tom, že jsou na povrch nasycované součásti unášeny aktivní molekuly CrCl_2 pomocí HCl nebo H_2 , které se přivádí přes ohřátou práškovou směs [1, 4].

Podstata difuzního chromování v solných koupelích spočívá v tom, že se do směsi solí BaCl_2 , CaCl_2 , případně MgCl_2 , přivádí 10 až 20 % CrCl_2 , dále se nad koupel přivádí vodík [1].

1.4.7 Difuzní křemíkování

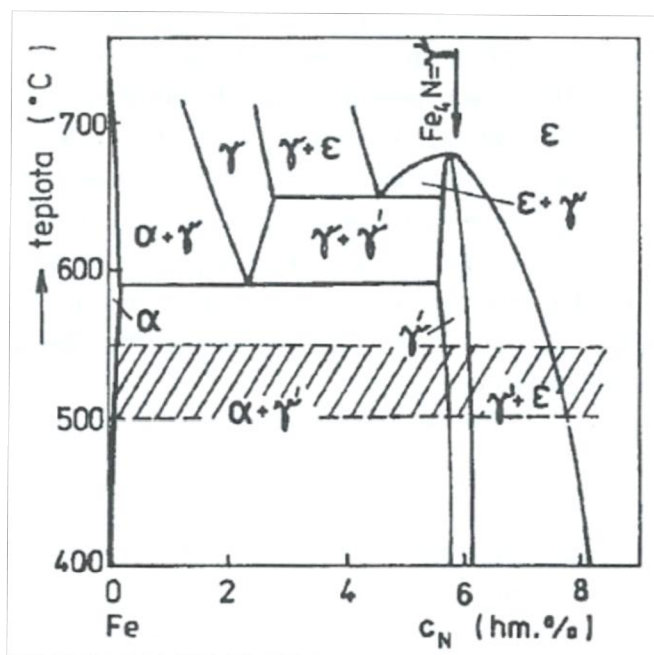
Křemíkování je proces, při kterém dochází k nasycování povrchu součásti křemíkem na 13 až 15 % Si v železe α . Hloubka vzniklé vrstvy dosahuje 0,3 až 1,0 mm. Křemíkováním je dosaženo vysoké odolnosti proti korozi v mořské vodě, v kyselinách ($\text{H}_2\text{SO}_4, \text{HCl}$) a odolnosti proti oxidaci při vyšších teplotách (do 750 °C). Metodou difuzního křemíkování se dosahuje nižší tvrdosti vrstvy, většinou okolo 200 až 250 HV. Křemíkované součásti mají nízkou houževnatost a vysokou křehkost. Při nasycení vrstvy olejem vykazuje vrstva vysokou odolnost vůči opotřebení vznikajícím při kluzném tření. Toto nasycení součásti olejem je možné díky dobré poréznosti povrchové vrstvy. Pro křemíkování se doporučují nízkouhlíkové oceli z důvodu negativního působení uhlíku na difuzi, která je jeho vlivem zpomalována. Proces difuzního křemíkování probíhá po dobu 4 až 12 hodin při teplotách 800 až 1100 °C v plynech nebo v práškových směsích [1, 4].

Při difuzním křemíkování v práškových směsích se směs skládá z vysokoprocentního ferosilicia, který obsahuje až 90 % křemíku, NH_4Cl a šamotu. Tento způsob křemíkování probíhá v plynotěsných krabicích a po skončení procesu se součásti pomalu ochlazují na teplotu 100 až 200 °C [1, 4].

Difuzní křemíkování v plynech se provádí tak, že se součást zasype ferosiliciem, popř. karbidem křemíku, a ohřívá se na teplotu sycení, následně se do pece přivádí HCl nebo Cl_2 [1, 4].

1.4.8 Nitridace

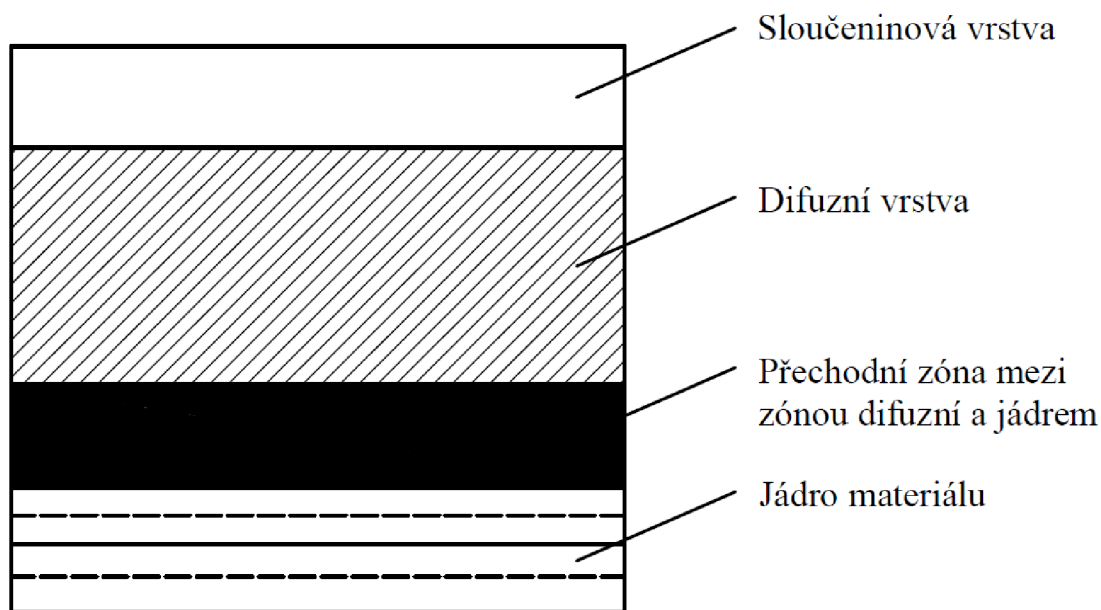
Jednou z metod chemicko-tepelného zpracování je nitridace, která spočívá v nasycování povrchu součásti dusíkem. Povrch součásti se dusíkem obohacuje na koncentraci až 12 hm. % N. Velké tvrdosti nitridované vrstvy je dosaženo vznikem nitridů, popř. karbonitridů, na povrchu součásti. Nejčastěji se nitridují konstrukční oceli s obsahem uhlíku 0,3 až 0,4 hm. % C. Proces probíhá v rozmezí teplot 500 až 550 °C a doba nitridace bývá až 60 hodin. Tloušťka nitridované vrstvy bývá velice tenká, dosahuje tvrdosti 1000 až 1200 HV a zachovává se až do teploty cca 600 °C. Požadovaných vlastností jádra je dosaženo zušlechtěním, které se provádí ještě před samotnou nitridací. Po nitridaci následuje už jen broušení součásti. Nitridováním se dosahuje zvýšení životnosti konstrukčních součástek, odolnosti proti opotřebení, korozivzdornosti atd. Díky všem těmto kladným vlastnostem lze nitridaci považovat za nejperspektivnější metodu chemicko-tepelného zpracování. Proces probíhá v kapalném (solné lázně) a plynném prostředí. V dnešní době je však nejrozšířenější metodou iontová (plazmová) nitridace. Pásmo nitridace v Fe-N diagramu je zobrazeno na obr. 1.9 [1, 2, 4].



Obr. 1.9 Část rovnovážného diagramu Fe-N s vyšrafovanou oblastí nitridace [2].

Struktura nitridované vrstvy

Vrstva vzniklá nitridací obsahuje většinou až 12 hm. % N. Dusík za přítomnosti nitridotvorných prvků, jako je Cr, Al a V, vytváří speciální nitridy (CrN , VN , AlN , Cr_2N), popř. karbonitridy. Struktura vrstvy se tímto stává značně složitou. Povrchová vrstva se skládá ze dvou hlavních částí: bílé (sloučeninové) vrstvy a difuzní vrstvy. Tyto dvě hlavní části jsou zobrazeny na obr. 1.10 [2 - 4].



Obr. 1.10 Strukturní zobrazení nitridované vrstvy [4].

Bílá (sloučeninová) vrstva je většinou tvořena ϵ fází, která se skládá z precipitátů Fe_{2-3}N . Tato vrstva vykazuje dobré kluzné vlastnosti a odolnost proti korozi v různých prostředích jako je voda, benzín, vlhká atmosféra atd. Vrstva dosahuje hloubky přibližně 0,01 až 0,05 mm. Bílá vrstva se při nitridaci vytváří za použití nitridační atmosféry s obsahem uhlíku okolo 0,5 % C. V případě použití atmosféry, která neobsahuje uhlík, dochází na povrchu k vytvoření souvislé vrstvičky γ' fáze. Tato γ' fáze se skládá z nitridů železa Fe_4N . Vrstva γ' fáze je stálá až do teploty 680 °C a má vysokou tvrdost a odolnost proti opotřebení. Při výše uvedené teplotě dochází k přeměně na ϵ fázi. V případě nitridace v plynném prostředí může docházet ke vzniku obou fází. Z důvodu rozdílných krystalických mřížek (γ' fáze – FCC, ϵ fáze – HCP) může vznikat mezi těmito vrstvami vnitřní pnutí, které vede ke vzniku mikroplastických trhlin, a proto je tento jev nevhodný [4].

Druhou hlavní částí vrstvy je difuzní zóna, která je tvořena α fází. Tato vrstva obsahuje precipitáty nitridů, legující prvky a karbonitridy železa. Vrstva je tím mělká, čím více se v ní nachází nitridotvorných prvků. Difuzní zóna vykazuje vysokou tvrdost a dobrou odolnost proti opotřebení a únavě [4].

Požadované fázové složení povrchové vrstvy je voleno dle funkce a způsobu namáhání součásti. Doporučení volba fázového složení je uvedena v tab. 1.1.

Tab. 1.1 Volba fázového složení povrchové vrstvy v závislosti na namáhání [3].

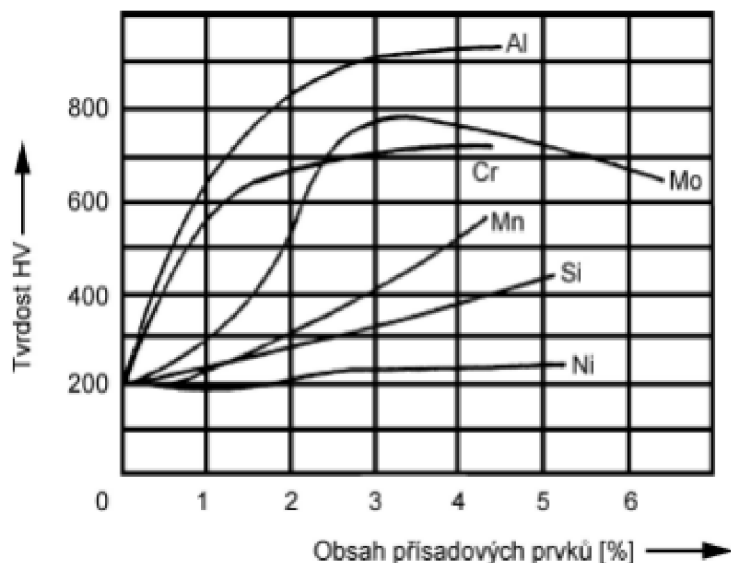
Charakter namáhání součásti	Obsah legovaných prvků v oceli	Fázové složení bílé vrstvy			Difuzní vrstva
		γ' fáze	ϵ fáze	$\gamma' + \epsilon$	
Otěrem	Nízký	+	++	Použití vícefázové vrstvy není vhodné	-
	Střední	++	+		-
	Vysoký	-	-		++
Únavou	Nízký	+	++		-
	Střední	+	+		++
	vysoký	-	-		++
Korozi	Nízký	-	++		-
	Střední	+	++		-
	Vysoký	-	+		+

++ velmi vhodné, + vhodné, - nevhodné

Pro nitridaci se používají oceli s obsahem uhlíku v rozmezí 0,2 až 0,6 % C. Množství uhlíku značně ovlivňuje vlastnosti vzniklé vrstvy. V případě malého množství uhlíku dochází k tvorbě tlusté a křehké vrstvy. Oceli s vysokým obsahem uhlíku však kladou odpor vůči difuzi dusíku, a proto je dosažení požadované vrstvy časově náročnější [3].

Podstatnou roli při nitridaci mají legující prvky, které mají vliv na výsledné vlastnosti. Při nitridaci se dusík přednostně slučuje s prvky, které mají vyšší afinitu. Tvrdost vrstvy je nejvíce zvyšována hliníkem a chromem (obr. 1.11). Ačkoliv hliník zvyšuje tvrdost, jeho velkou nevýhodou je zvyšování křehkosti. Toto zvýšení křehkosti lze odstranit přidáním molybdenu, který zvyšuje houževnatost vrstvy a snižuje popouštěcí

křehkost. Podstatný vliv na tvorbu nitridu má také uhlík, který při sloučení s karbidotvornými prvky zabraňuje tvorbě nitridu [3].



Obr. 1.11 Závislost tvrdosti nitridační vrstvy na legujících prvcích [4].

Hloubka nitridované vrstvy

Hloubka nitridované vrstvy se odvíjí od druhu namáhání, ke kterému je součást určena. Běžně se u konstrukčních ocelí předepisují hloubky nitridované vrstvy okolo 0,2 až 0,6 mm. V případě namáhání součásti cyklicky na ohyb postačuje hloubka vrstvy 0,1 až 0,2 mm. U součástí přenášejících velké měrné tlaky se hloubka vrstvy zvyšuje na hodnoty 0,4 až 0,5 mm. U ozubených kol se hloubka vrstvy volí jako 1/10 modulu zubů, např. pro modul 4-5 se volí hloubka vrstvy 0,4 až 0,5 mm. Čím větší je hloubka nitridované vrstvy, tím nižší je vrubová houževnatost. Při volbě tloušťky vrstvy si je tedy potřeba uvědomit, že zvětšením tloušťky vrstvy nemusí být dosaženo pouze pozitivních vlastností součásti [1, 4].

Při nitridaci dochází k nepatrným změnám rozměru součásti. Z tohoto důvodu po nitridaci následuje broušení, je tedy důležité tuto operaci zohlednit při volbě tloušťky vrstvy. Nitridovaná vrstva vykazuje dobrou odolnost proti zadírání a velmi dobré kluzné vlastnosti, proto se broušení provádí pouze z důvodu dosažení správnosti předepsaných rozměrů [1].

Hloubka nitridační vrstvy se u součástí určuje dle normy ON 42 0020. Hodnoty jsou zobrazeny v tab. 1.2 [4].

Tab. 1.2 Hloubka nitridované vrstvy u uvedených součástí (hodnoty v mm) [4].

Průměr díry nebo hřídele, popř. tloušťka stěny	Doporučená hloubka nitridované vrstvy
10 - 50	0,2 – 0,4
50 - 200	0,3 – 0,5
200 - 300	0,4 – 0,6
300 – 350	0,5 – 0,7

Nitridace v plynném prostředí

Nitridace v plynném prostředí probíhá v plynech, které obsahují NH_3 . Proces probíhá za teplot okolo $520\text{ }^\circ\text{C}$ a po celou jeho dobu se udržuje vysoká hodnota parciálního tlaku NH_3 , aby byla zajištěna vysoká aktivita dusíku. Součásti se obvykle nitridují v šachtových, plynotěsných zvonových nebo komorových pecích. Během nitridace se na povrchu vytváří tvrdé nitridy, které zlepšují vlastnosti povrchové vrstvy součástí, jako je odolnost proti opotřebení, otěru a zadírání. Nejčastěji se tímto způsobem nitridují součásti, které jsou vystavovány vysokým zatížením [1, 2, 7].

Pro nitridaci v plynech lze použít pouze oceli s obsahem chromu do 5 %. Nitridují se nástrojové oceli určené např. pro práci za tepla, za studena, popř. k výrobě forem. Nitridací pružinových ocelí dochází k prodloužení únavové životnosti. Nejlepších výsledků nitridace v plynech je však dosaženo při použití nitridačních ocelí, které jsou již pro tento účel legovány [7].

Nitridování v plynném prostředí v technické praxi není oproti nitridování v solné lázni často využíváno. Důvodem je časová náročnost, např. nitridace součásti z rychlořezné oceli, u které je požadavek na hloubku vrstvy 0,02 mm, trvá při teplotě $520\text{ }^\circ\text{C}$ v solné lázni přibližně 30 minut, nitridace v plynném prostředí trvá okolo 120 minut. Z tohoto důvodu se v plynném prostředí nitridují součásti, které je obtížné nitridovat v solných koupelích [6].

Nitridace v solných lázních

Nitridace v solných lázních probíhá v roztavené směsi složené z kyanidů a kyanatanů. Nejčastěji se používá sůl NS 350. Před samotnou nitridací se však musí povrch součásti důkladně očistit a odmastit. Poté se součást předehtívá ve vzduchové lázni na teplotu okolo $400\text{ }^\circ\text{C}$, po dosažení této teploty se součást přesune do solné lázně (NS 350) o teplotě 500 až $590\text{ }^\circ\text{C}$, kde se nitriduje. Tímto procesem je dosaženo zlepšení odolnosti proti opotřebení a únavě [1, 6, 7].

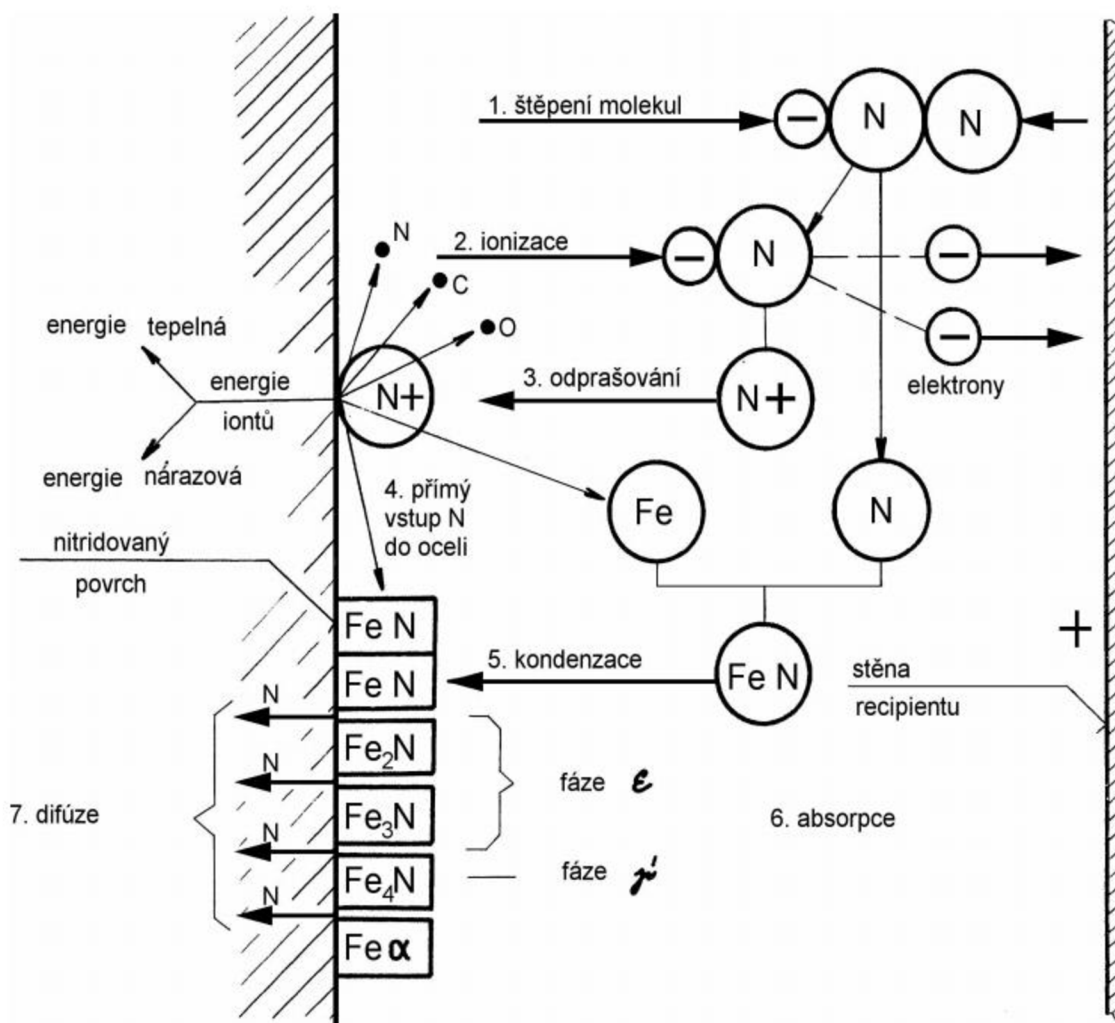
Nitridování v solných lázních je však spojeno s problémy. Vlivem prudce jedovatých solí, které se během procesu používají, dochází k naleptávání povrchu součásti solnou taveninou. Z tohoto důvodu je čas ponoření součásti v solné lázni omezen přibližně na 4 hodiny. Toto snížení času procesu má však za následek omezení hloubky nitridované vrstvy. V případě, že by byla součást ponořena delší dobu, mělo by to zásadní vliv na kvalitu jejího povrchu. Další nevýhodou spojenou s výše uvedenou jedovatou solí je vznik jedovatého odpadu a jeho složitá likvidace [1].

Iontová (plazmová) nitridace

Obdobně jako jiné způsoby nitridace probíhá i iontová nitridace za přítomnosti dusíku na povrchu kovu. Během procesu jsou součásti uloženy ve vakuové nádobě (recipientu), kde jsou zapojeny jako katoda. Recipient je připojen jako anoda a po dobu procesu je v něm udržován snížený tlak zředěné směsi plynů. Tato směs plynů bývá nejčastěji složená z dusíku (N_2) a vodíku (H_2). Mezi povrchem součásti (katodou) a stěnou recipientu (anodou) vzniká po připojení stejnosměrného proudu o napětí 400 až 1 000 V elektrické pole. Proud, napětí a tlak musí být nastaveny přesně tak, aby odpovídaly oblasti anomálního výboje. Ve vzniklém elektrickém poli začínají molekuly zředěného plynu migrovat a vlivem nárazu dochází k jejich štěpení a ionizaci. Kladné ionty jsou urychlovány směrem k povrchu součásti (katodě). K největšímu nárůstu rychlosti iontů dochází až v bezprostřední blízkosti povrchu součásti, tzn. nárůst rychlosti a s ním spojená

kinetická energie není lineární. Z toho vyplývá, že největší intenzita dějů, které probíhají v anomálním doutnavém výboji, je soustředěna do úzkého pásma u povrchu součásti. Nezáleží přitom na tvaru součásti ani na vzdálenosti od recipientu. K největšímu štěpení a ionizaci dochází právě v tomto pásnu [8].

Na obr. 1.12 jsou zobrazeny děje, které probíhají na povrchu součásti, lze je popsat takto: Povrch součásti je bombardován kladnými ionty. Vlivem dopadu se část jejich energie přeměňuje na teplo a součást je ohřívána. Současně dopadající ionty vyrážejí z povrchu oceli (součásti) atomy železa a jiné prvky. Tento jev je nazýván odprašování, nebo také katodové odprašování, a je považován za nejvýznamnější děj u iontové nitridace. Reakce dopadajících iontů s odprašovanými atomy vede ke vzniku nitridů železa bohatých na dusík [8].



Obr. 1.12 Schéma dějů probíhajících na povrchu součásti při iontové nitridaci [4].

Zařízení pro iontovou nitridaci

Schéma zařízení s jednotlivými částmi je zobrazeno na obr. 1.13. Tyto části jsou:

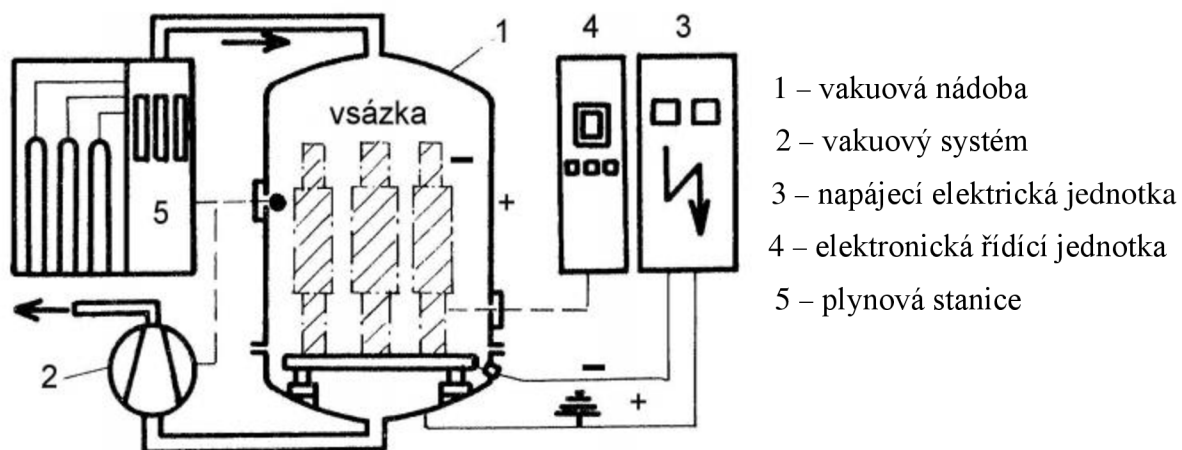
Vakuová nádoba (recipient) - v některých literaturách bývá také uváděna pod názvem vakuová nebo pracovní komora. Uvnitř každého recipientu musí být dvě elektrody (anoda a katoda), které umožňují vznik elektrického pole. Katodu tvoří součást a anoda je tvořena samotným recipientem. Vakuová nádoba společně s vsázkou je zobrazena na obr. 1.14.

Vakuový systém - je propojen s recipientem, konkrétně s jeho vnitřním prostorem. Tento systém odčerpává vzduch z prostoru do takového vakua, aby zbytky vzduchové atmosféry neovlivňovaly průběh procesu. Počáteční tlak bývá okolo 5 až 10 Pa. Po zapnutí elektrického proudu začíná být do počátečního vakua dávkována nitridační atmosféra, která navýší tlak k hodnotám 100 až 800 Pa. Vakuový systém tento tlak udržuje na požadovaných hodnotách.

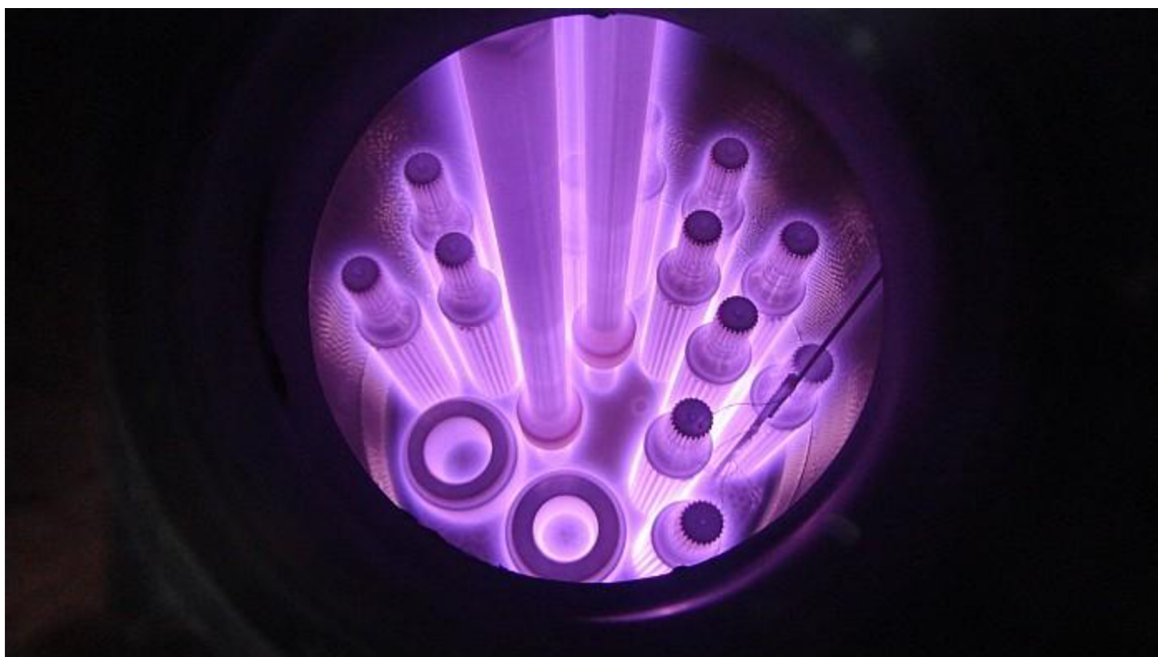
Elektrická napájecí jednotka – dodává stejnosměrný proud o napětí 250 až 1 000 V, který slouží k zapálení a udržování doutnavého výboje. Výkon této jednotky je dán maximální plochou povrchu katody (vsázky).

Elektrická řídicí a kontrolní jednotka – zabezpečuje průběh procesu a pomocí čidel chrání zařízení a nitridované součásti. Při poruše by totiž mohlo dojít k přehřátí, přerušení dodávky plynů nebo vody. V takových případech dochází k automatickému vypnutí zařízení.

Plynová stanice – slouží k přepravě nitridační atmosféry a dodávání dalších plynů. Zpravidla bývá uspořádána jako samostatná část nitridačního zařízení [8].



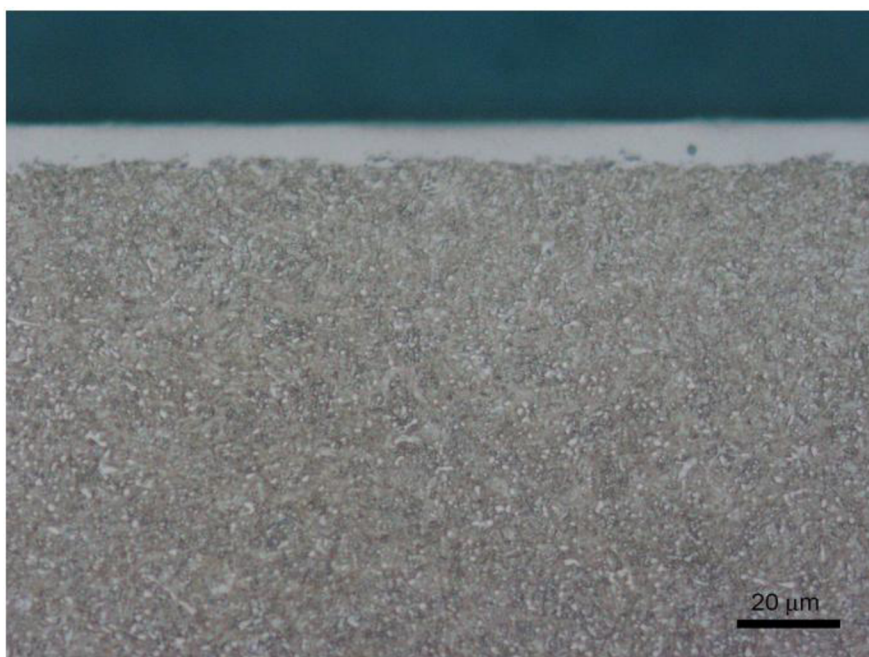
Obr. 1.13 Schéma zařízení používaného pro iontovou nitridaci [3].



Obr. 1.14 Pohled na vakuovou nádobu s vsázkou [9].

Složení a vlastnosti iontově nitrídaných vrstev

Iontově nitrídaná vrstva se skládá ze dvou částí, které jsou zobrazeny na obr. 1.15. Zde lze vidět jednotlivé části vrstvy v řezu u ložiskové oceli 100CrMn6, která byla iontově nitrídaná. Je zde patrná tzv. bílá vrstva (světlejší), která je od difuzní vrstvy výrazně odlišená (tmavší). Nejbliže u povrchu se nachází bílá vrstva, která je tvořena intermetalickou sloučeninou dusíku a železa. Pod touto vrstvou se nachází difuzní vrstva, která dosahuje hloubky zhruba několik desetin milimetru [3, 8].



Obr. 1.15 Vzhled iontově nitrídané vrstvy v řezu u ložiskové oceli 100CrMn6 [3].

Iontovou nitridací lze dosáhnout zvýšení odolnosti proti opotřebení a proti zvýšeným teplotám. Odolnost proti zvýšeným teplotám má velký význam zvláště u součástí namáhaných třením, jako jsou např. šoupátka, válce motorů, ventily atd. Tvrdost nitridované vrstvy je stálá až do 500 až 600 °C, zatímco tvrdost u součástí cementovaných, popř. kalených, klesá již při teplotách nad 200 °C. Další vlastností je odolnost proti korozi, a to i v různých prostředích, jako např. v mořské i tlakové vodě, přehřáté páře atd. Nitridováním se také zvyšuje mez únavy součásti a odstraňuje se citlivost součásti vůči vrubům [8].

Jednou z typických vlastností nitridování je, že součást nabývá na objemu. Součást se obvykle změní v rozsahu okolo 0,02 až 0,05 mm na plochu. Záleží však na tvaru součásti, např. u součásti ve tvaru tyčí dochází k protažení, zatímco u součástí dutých dochází k roztažení. Touto problematikou se bude dále zabývat praktická část bakalářské práce [8].

Dle účelu použití lze iontovou nitridaci rozdělit do tří skupin:

- nitridování za účelem zvýšení tvrdosti,
- nitridování za účelem zvýšení meze únavy,
- nitridování pro zvýšení ochrany proti korozi.

Těchto předností je dosaženo při nitridaci buď společně, nebo jednotlivě. Vše záleží na charakteru namáhání součásti. Podle účelu použití součásti se volí složení vrstvy. V případě nitridace za účelem zlepšení odolnosti proti korozi nejvíce záleží na co nejtlustší, nejkompaktnější a dusíkem nejbohatší bílé vrstvě. Pro zvýšení únavy je naopak rozhodující pouze tloušťka a tvrdost difuzní vrstvy [8].

Materiály vhodné pro iontovou nitridaci

Nitridovat lze v podstatě všechny druhy ocelí, ale výsledné vlastnosti jsou závislé na technickém postupu nitridace a chemickém složení oceli. Nitridují se tedy např. železné materiály (konstrukční, cementační a nástrojové oceli), vysokopevnostní a nerezové oceli a litiny [9].

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Vzorky

Jako vzorky byly použity válečky a kroužky. Tyto vzorky byly vyrobeny o různých rozměrech a z různých materiálů, a to vždy po dvou kusech.

2.1.1 Použité materiály

Jako materiály vzorků byly použity následující oceli:

- 16MnCr5 (dle ČSN 14 220),
- 42CrMo4 (dle ČSN 15 142),
- X5CrNi 18-10 (dle ČSN 17 240).

16MnCr5

Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou mangan-chromovou ocel, která slouží k cementování a je jednou z nejčastěji používaných ocelí pro středně namáhané díly strojů a motorových vozidel. Tato ocel je svařitelná, vhodná pro tepelné zpracování a dobře tvářitelná za studena. U součásti do průměru 11 mm se u vzorku po kalení a popouštění při 150 až 200 °C dosahuje meze kluzu $R_e = 735$ MPa a meze pevnosti přibližně $R_m = 1200$ MPa. Chemické složení oceli je zobrazeno v tab. 2.1 [10].

Tab. 2.1 Chemické složení oceli 16MnCr5 (v hmotnostních %) [10].

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	Cr
	0,14 – 0,19	max. 0,40	1,00 – 1,30	max. 0,035	max. 0,035	0,80 – 1,10

42CrMo4

Jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom-molybdenovou ocel, která slouží k zušlechťování. Po zakalení tato ocel dosahuje tvrdosti přibližně 58 HRC. Do průměru 100 mm lze zušlechťením dosáhnout pevnosti 1000 MPa při zachování dostatečné houževnatosti. V kaleném stavu vykazuje dobrou odolnost proti opotřebení. Chemické složení této oceli je zobrazeno v tab. 2.2 V zušlechťeném stavu se u součásti s průměrem menším než 16 mm dosahuje meze kluzu $R_e = 900$ MPa a meze pevnosti $R_m = 1200$ MPa [11].

Tab. 2.2 Chemické složení oceli 42CrMo4 (v hmotnostních %) [11].

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
	0,38 – 0,45	max. 0,40	0,60 – 0,90	max. 0,025	max. 0,035	0,90 – 1,20	0,15 – 0,30

X5CrNi 18-10

Jedná se o austenitickou korozivzdornou ocel. Ocel je nemagnetická a velmi dobře odolává korozi v různých prostředích, jakými jsou pitná voda, organické kyseliny atd. Díky své dobré odolnosti proti korozi se ocel často používá v potravinářském průmyslu. Mez kluzu je $R_e = 210$ MPa a mez pevnosti R_m se pohybuje v rozmezí 520 – 720 MPa. Chemické složení oceli je zobrazeno v tab. 2.3 [12, 13].

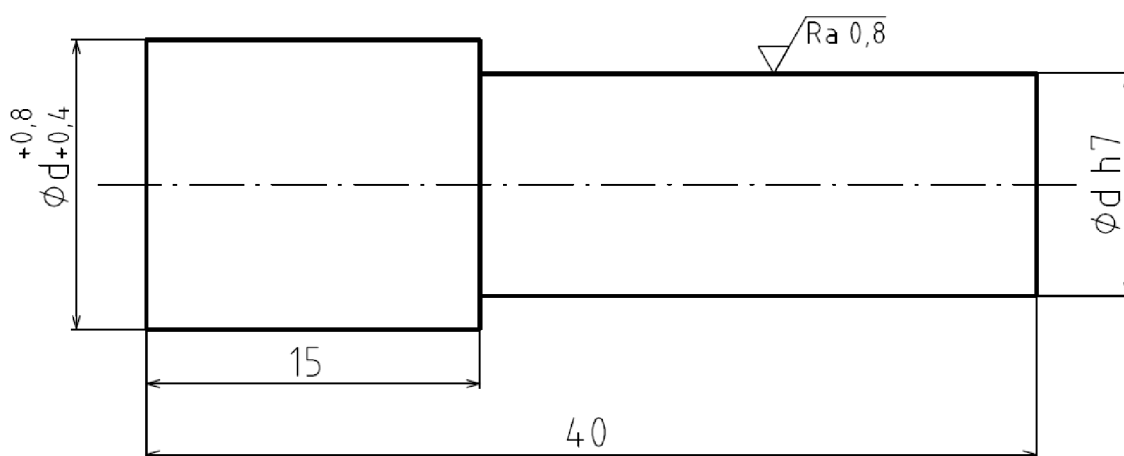
Tab. 2.3 Chemické složení oceli X5CrNi 18-10 (v hmotnostních %) [12].

Chemické složení	C	Si	Mn	P	S	N	Mo	Cr	Ni
	max. 0,07	max. 1,00	max. 2,00	max. 0,045	max. 0,030	max. 0,11	0,15 – 0,30	17,00 – 19,50	8,00 – 10,50

2.1.2 Výroba vzorků

Vzorky byly vyrobeny metodami třískového obrábění. Nejprve byl však materiál nařezán z jednotlivých polotovarů na požadovanou délku. Dále byly vzorky vyrobeny následovným způsobem:

Válečky (viz obr. 2.1)



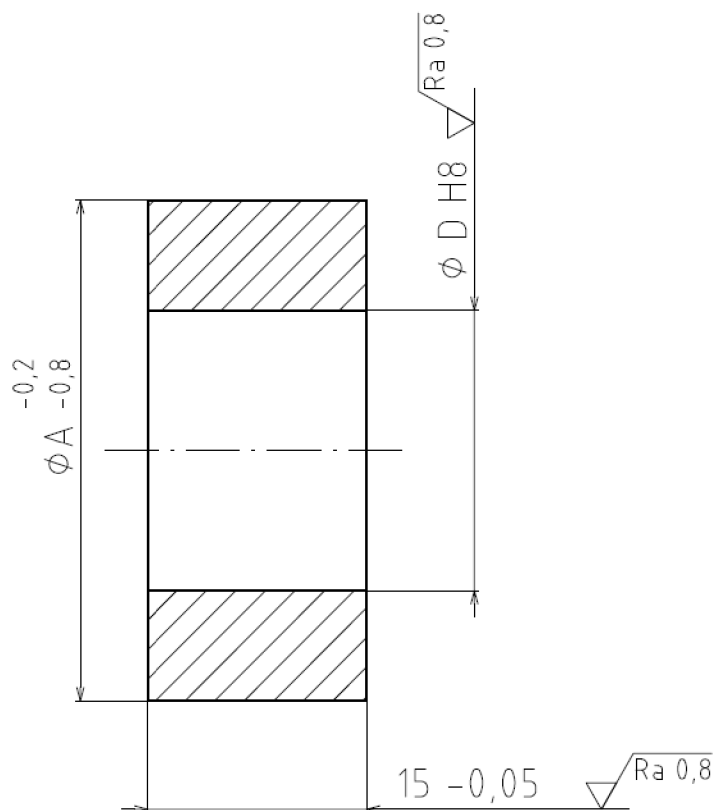
Obr. 2.1 Nákres válečku.

Po nařezání jednotlivých materiálů na pásové pile na délku $L = 85$ mm byly materiály odeslány na soustruh, kde byly upíchnuty a soustruženy na požadovaný tvar. Z důvodu následného rozpoznání jednotlivých vzorků při měření byly obrobky (vzorky) odeslány na rycí popis, kde byly označeny. Jednotlivé materiály vzorků, jejich rozměry a značení jsou uvedeny v tab. 2.4.

Tab. 2.4 Materiály, rozměry a značení válečků.

ϕd	Materiál	Popis	Ks
$\phi 9$	16MnCr5	9A	2
$\phi 9$	42CrMo4	9B	2
$\phi 9$	X5CrNi 18-10	9C	2
$\phi 14$	16MnCr5	14A	2
$\phi 14$	42CrMo4	14B	2
$\phi 14$	X5CrNi 18-10	14C	2
$\phi 34$	16MnCr5	34A	2
$\phi 34$	42CrMo4	34B	2
$\phi 34$	X5CrNi 18-10	34C	2

Kroužky (viz obr. 2.2)



Obr. 2.2 Nákres kroužku.

I v tomto případě byly jednotlivé materiály po nařezání na pásové pile na $L = 17$ mm odeslány na soustruh, kde byly soustruženy na požadovaný tvar. U těchto kroužků se materiály na soustruhu neupichovaly, ale byly na požadovaný rozměr nařezány už při první operaci (řezání na pásové pile). Následně bylo nutné vzorky obdobně jako u válečků označit na rycím popisu. Nakonec byly vzorky broušeny na požadovaný rozměr (toleranci) na brusce na plocho (čela kroužků) a na otvorové brusce (otvory). Jednotlivé materiály kroužků, jejich rozměry a značení jsou uvedeny v tab. 2.5.

Tab. 2.5 Materiály, rozměry a značení kroužků.

ϕA	ϕD	Materiál	Popis	Ks
$\phi 35$	$\phi 15$	16MnCr5	3A	2
$\phi 35$	$\phi 15$	42CrMo4	3B	2
$\phi 35$	$\phi 15$	X5CrNi 18-10	3C	2
$\phi 60$	$\phi 40$	16MnCr5	6A	2
$\phi 60$	$\phi 40$	42CrMo4	6B	2
$\phi 60$	$\phi 40$	X5CrNi 18-10	6C	2
$\phi 80$	$\phi 60$	16MnCr5	8A	2
$\phi 80$	$\phi 60$	42CrMo4	8B	2
$\phi 80$	$\phi 60$	X5CrNi 18-10	8C	2

2.1.3 Druh použité nitridace

Nitridace probíhala u externí firmy. Konkrétně se jednalo o iontovou (plazmovou) nitridaci, dále jen nitridaci. Dílce byly nitridovány v pecích (obr. 2.3), které si firma sama vyrábí, v atmosféře tvořené čpavkem (NH_3) při tlaku $p=2,4$ mbar. Proces probíhal za teploty 495 °C po dobu 10 hodin. Nabízené hloubky nitridace u použitých materiálů jsou v tab. 2.6.

Tab. 2.6 Dosahované hloubky nitridované vrstvy externí firmou.

Značení materiálu			Hloubka
DLE ČSN EN	Dle ČSN	Dle DIN	
16MnCr5	14 220	1.7131	0,3 – 0,6
42CrMo4	15 142	1.7225	0,3 – 0,4
X5CrNi 18-10	17 240	1.4301	0,05 – 0,15



Obr. 2.3 Nitridační pec v provozu (vlevo) a otevřená (vpravo).

2.2 Měření

Vzorky byly měřeny vždy před a po nitridaci. Každý rozměr byl změřen třikrát a z naměřených hodnot byla vytvořena jedna průměrná hodnota. Měření probíhala na digitálním mikrometrickém měřidle a na následujících měřicích přístrojích:

ZEISS PRISMO navigator (PRISMO 5)

Jedná se o měřicí stroj firmy ZEISS, který je určený pro vysokorychlostní skenování. Stroj díky své dobré konstrukci a korekci dynamických vlivů působících během měření dosahuje vysoké přesnosti. PRISMO navigator je standardně vybaven multisenzorovým systémem, který umožňuje dotykové a optické měření. Stroj používá software CALIPSO, který je určen pro manuální i CNC měření. Po několika kliknutích definuje CALIPSO měřený prvek a vygeneruje automaticky vhodnou strategii měření daného prvku. Konkrétní měřicí stroj použitý při měření je zobrazen na obr. 2.4 [14].



Obr. 2.4 ZEISS PRISMO 5.

TRIMOS V3

Jedná se o vertikální měřicí přístroj určený pro měření v dílenských podmínkách, který dosahuje přesnosti 0,001 mm. TRIMOS V3 je vybaven digitálním displejem, díky kterému je možné přesně odečítat naměřené hodnoty, a jeho obsluha je proto velmi jednoduchá. Na přístroji je možné měřit délkové rozměry a dále také průměry. Konkrétní (použitý) TRIMOS V3 je zobrazen na obr. 2.5 [15].



Obr. 2.5 Měřicí přístroj TRIMOS V3.

Měření válečků probíhalo na přístroji TRIMOS V3, kde byly měřeny jejich délky, a na mikrometrickém měřidle, na kterém byly měřeny průměry. Pro měření délek kroužků byl obdobně jako u válečku použit měřicí přístroj TRIMOS V3. K měření vnitřních průměrů kroužků byl použit měřicí stroj ZEISS PRISMO 5.

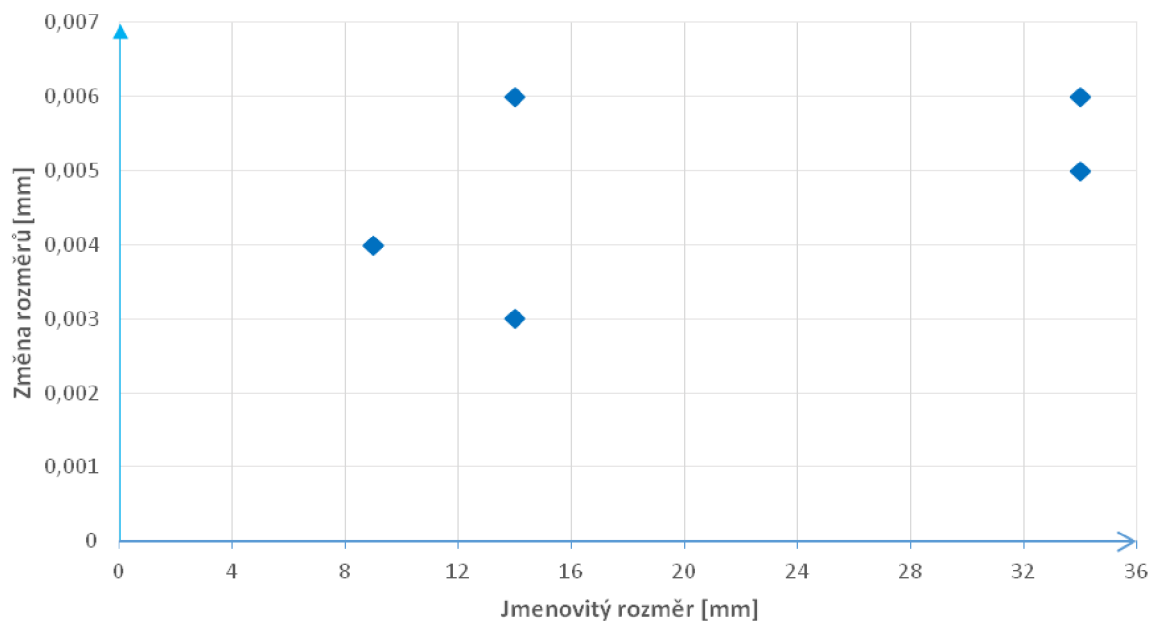
2.2.1 Válečky

Naměřené hodnoty válečků byly zapsány a seřazeny podle materiálu do níže uvedených tabulek (tab. 2.7 – 9). Dále pak byly z hodnot průměru u válečků vytvořeny grafy změny rozměru v závislosti na jmenovitém rozměru (viz obr. 2.6 – 2.8).

Tab. 2.7 Rozměry válečku z materiálu 16MnCr5 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	9A			14A			34A		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů
$\varnothing d h7$ (1. kus)	8,994	8,998	+0,004	13,992	13,998	+0,006	33,994	34,000	+0,006
$\varnothing d h7$ (2. kus)	8,994	8,998	+0,004	13,993	13,996	+0,003	33,994	33,999	+0,005
$40 \pm 0,2$ (1. kus)	40,011	40,034	+0,023	39,992	40,002	+0,010	39,999	40,009	+0,010
$40 \pm 0,2$ (2. kus)	39,980	39,998	+0,018	40,025	40,035	+0,010	39,984	39,990	+0,006

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u válečků (materiál 16MnCr5)

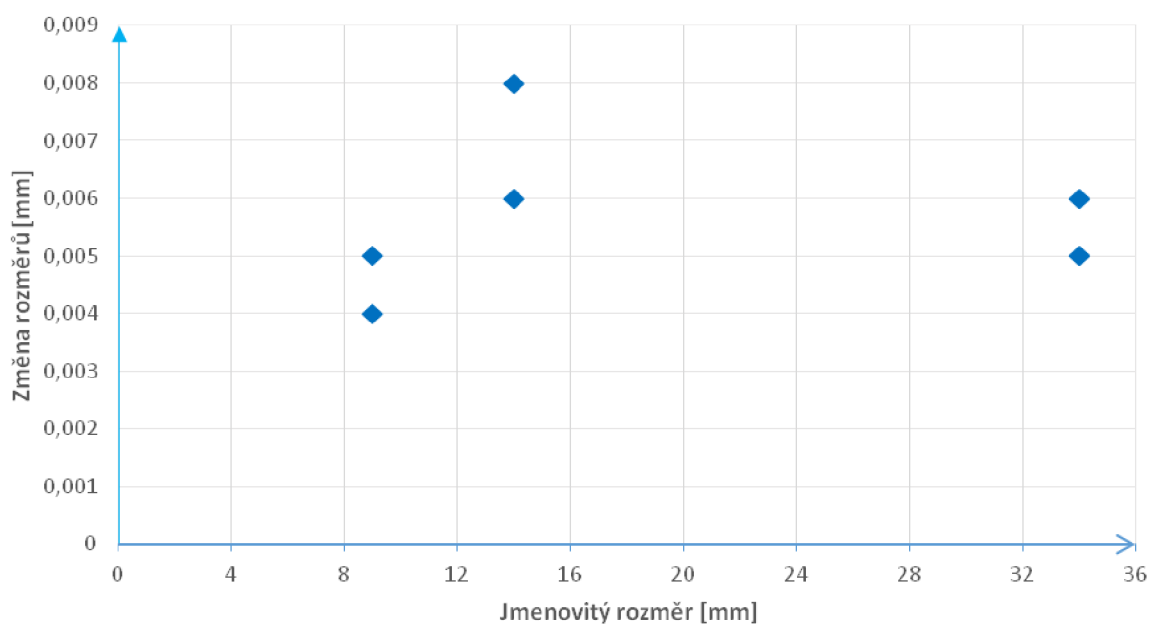


Obr. 2.6 Změna rozměrů u materiálu 16MnCr5 v závislosti na průměru válečků.

Tab. 2.8 Rozměry válečku z materiálu 42CrMo4 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	9B			14B			34B		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů
$\varnothing d h7$ (1. kus)	8,994	8,998	+0,004	13,992	14,000	+0,008	33,994	33,999	+0,005
$\varnothing d h7$ (2. kus)	8,993	8,998	+0,005	13,993	13,999	+0,006	33,993	33,999	+0,006
$40 \pm 0,2$ (1. kus)	40,003	40,030	+0,027	39,975	39,992	+0,017	39,989	39,996	+0,007
$40 \pm 0,2$ (2. kus)	39,989	40,016	+0,027	40,012	40,023	+0,011	39,997	40,004	+0,007

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u válečků (materiál 42CrMo4)

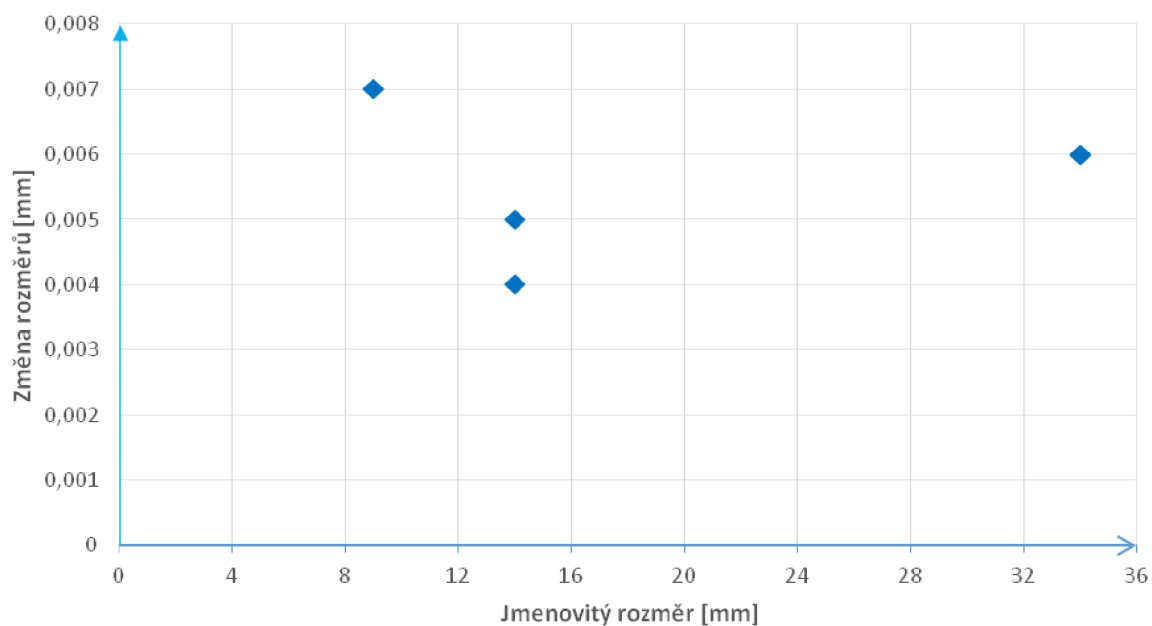


Obr. 2.7 Změna rozměrů u materiálu 42CrMo4 v závislosti na průměru válečků.

Tab. 2.9 Rozměry válečku z materiálu X5CrNi 18-10 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	9C			14C			34C		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů
∅ d h7 (1. kus)	8,996	9,003	+0,007	13,994	13,999	+0,005	33,995	34,001	+0,006
∅ d h7 (2. kus)	8,995	9,002	+0,007	13,994	13,998	+0,004	33,996	34,002	+0,006
40 ± 0,2 (1. kus)	40,017	40,011	-0,006	40,027	40,029	+0,002	39,990	39,991	+0,001
40 ± 0,2 (2. kus)	40,038	40,024	-0,014	39,994	39,996	+0,002	40,063	40,053	-0,010

Závislost změny rozměrů na jmenovitem rozměru u válečků (materiál X5CrNi 18-10)



Obr. 2.8 Změna rozměrů u materiálu X5CrNi 18-10 v závislosti na průměru válečků.

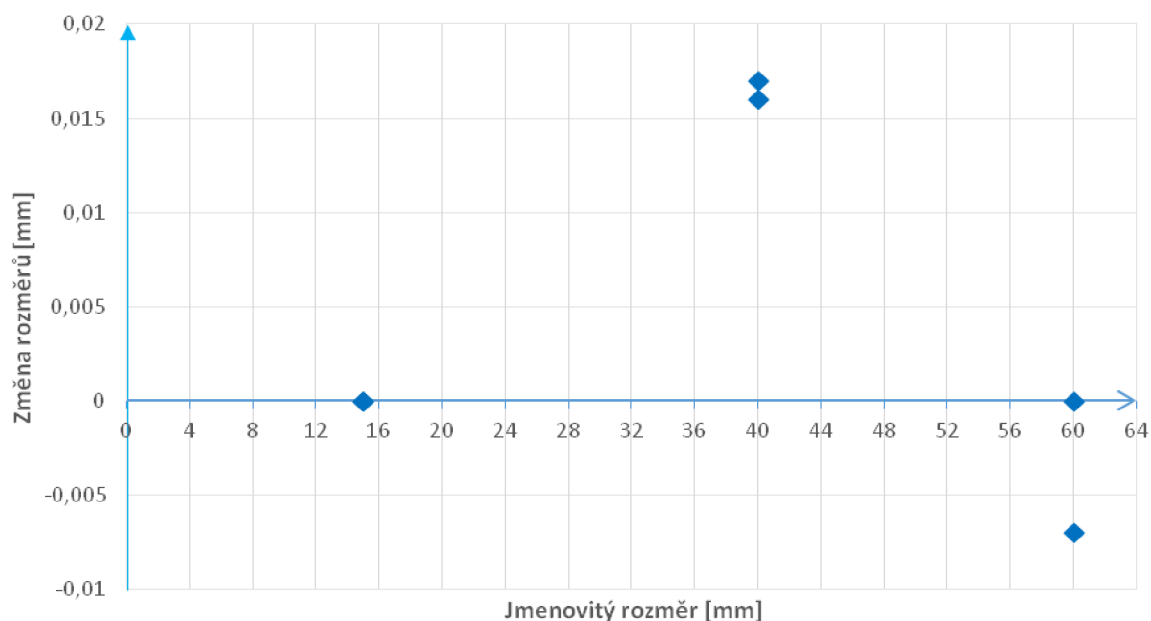
2.2.2 Kroužky

Naměřené hodnoty kroužků byly zapsány a seřazeny podle materiálu do níže uvedených tabulek (tab. 2.10 – 12). Dále pak byly z hodnot průměru u kroužků vytvořeny grafy změny rozměru v závislosti na jmenovitém rozměru (viz obr. 2.9 – 2.11).

Tab. 2.10 Rozměry kroužků z materiálu 16MnCr5 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	3A			6A			8A		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitridaci	Změna rozměrů
ø D H8 (1. kus)	15,015	15,015	0,000	40,013	40,030	+0,017	60,014	60,014	0,000
ø D H8 (2. kus)	15,012	15,012	0,000	40,009	40,025	+0,016	60,018	60,011	-0,007
15 -0,05 (1. kus)	14,977	14,987	+0,010	14,975	14,992	+0,017	14,973	14,986	+0,013
15 -0,05 (2. kus)	14,976	14,988	0,012	14,975	14,994	+0,019	14,977	14,991	+0,014

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u kroužků (materiál 16MnCr5)

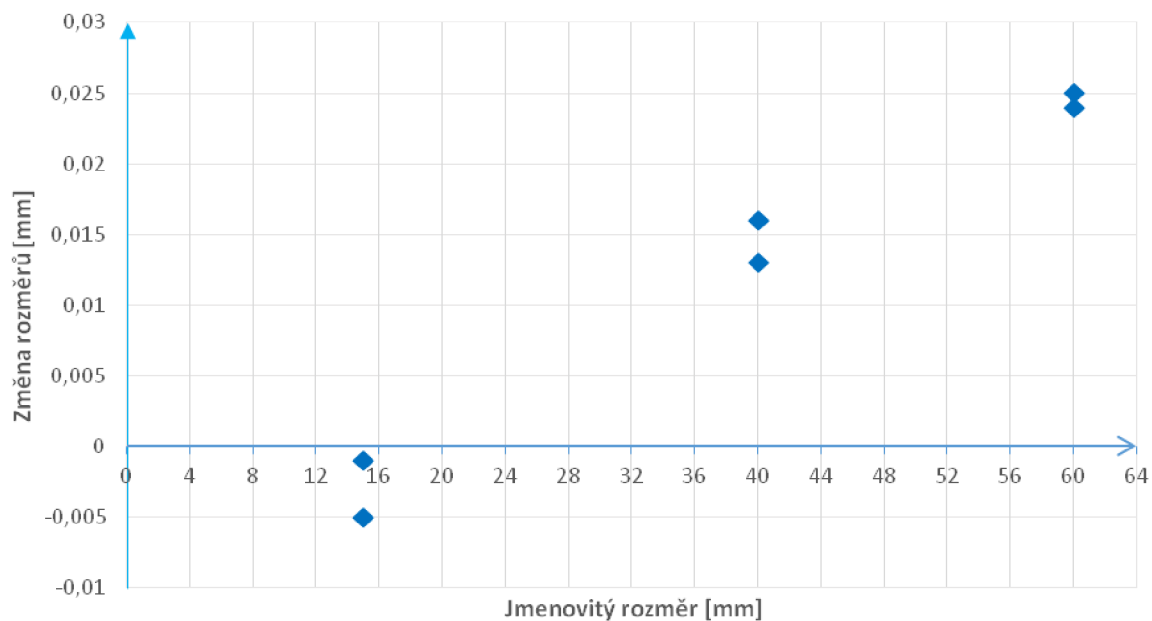


Obr. 2.9 Změna rozměrů u materiálu 16MnCr5 v závislosti na vnitřním průměru kroužků.

Tab. 2.11 Rozměry kroužků z materiálu 42CrMo4 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	3B			6B			8B		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů
ø D H8 (1. kus)	15,012	15,007	-0,005	40,018	40,034	+0,016	60,010	60,034	+0,024
ø D H8 (2. kus)	15,010	15,009	-0,001	40,039	40,052	+0,013	60,008	60,033	+0,025
15 – 0,05 (1. kus)	14,975	14,984	+0,009	14,974	14,987	+0,013	14,975	14,986	+0,011
15 – 0,05 (2. kus)	14,976	14,987	+0,011	14,974	14,983	+0,009	14,974	14,983	+0,009

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u kroužků (materiál 42CrMo4)

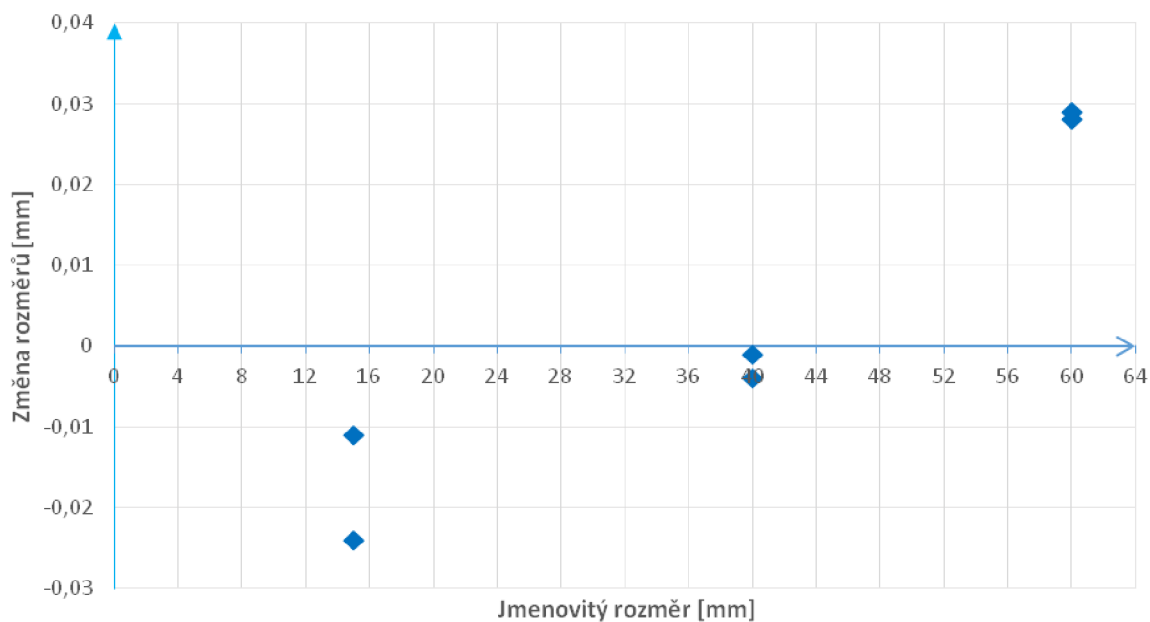


Obr. 2.10 Změna rozměrů u materiálu 42CrMo4 v závislosti na vnitřním průměru kroužků.

Tab. 2.12 Rozměry kroužků z materiálu X5CrNi 18-10 (hodnoty v mm).

Rozměry	Naměřené hodnoty								
	3C			6C			8C		
	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů	Před nitrid.	Po nitrid.	Změna rozměrů
ø D H8 (1. kus)	15,014	14,990	-0,024	40,013	40,012	-0,001	60,009	60,038	+0,029
ø D H8 (2. kus)	15,010	14,999	-0,011	40,008	40,004	-0,004	60,010	60,038	+0,028
15 – 0,05 (1. kus)	14,976	14,994	+0,018	14,975	14,997	+0,022	14,972	15,000	+0,028
15 – 0,05 (2. kus)	14,975	14,993	+0,018	14,971	14,995	+0,024	14,976	15,003	+0,027

Závislost změny rozměrů na jmenovitem rozměru u kroužků (materiál X5CrNi 18-10)



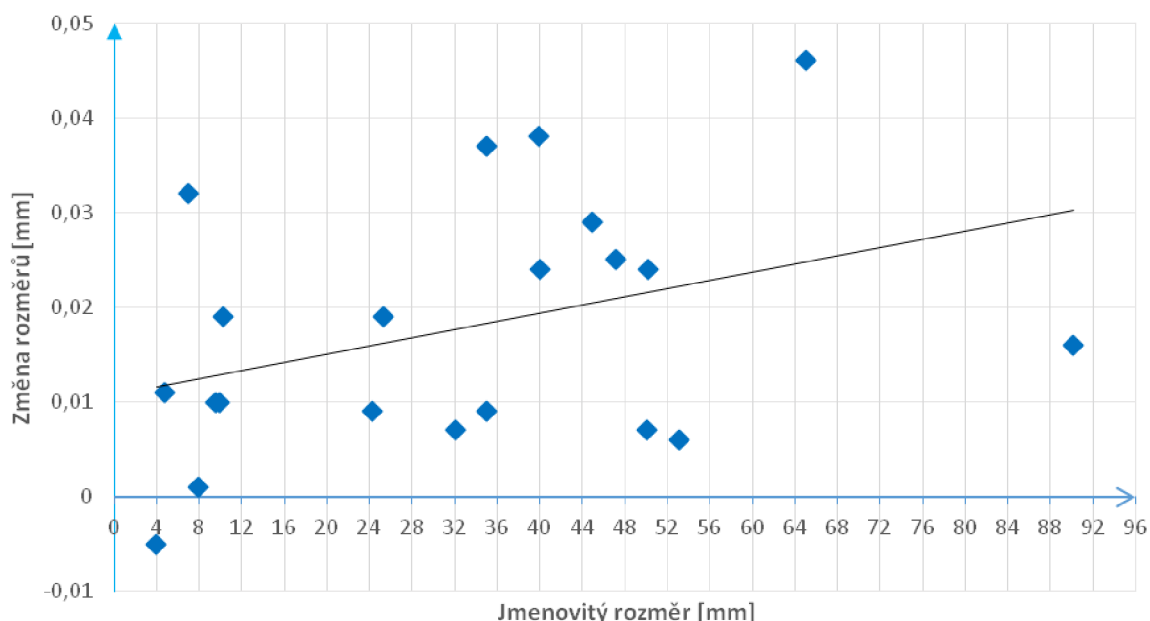
Obr. 2.11 Změna rozměrů u materiálu X5CrNi 18-10 v závislosti na vnitřním průměru kroužků.

2.2.3 Skutečné kusy

Měření vlivu chemicko-tepelného zpracování bylo dále také provedeno na skutečných (reálných) kusech, které byly vyrobeny z materiálu 16MnCr5 (dle ČSN 14 220). Jedná se o kusy, které byly nitridované (PŘÍLOHA 1 – 7) a cementované (PŘÍLOHA 8 – 14). Tyto kusy se od sebe liší tvarem a rozměry. Cílem měření těchto skutečných kusů je zjistit, jak se daný materiál bude chovat (měnit své rozměry) v závislosti na zvětšujícím se rozměru a dále také na tvaru součásti. Naměřené hodnoty jednotlivých součástí jsou zobrazeny v tabulkách, které společně s nákresy tvoří přílohy. Každá příloha je tedy tvořena tabulkou s naměřenými hodnotami a nákresem, na kterém jsou kótami tyto hodnoty vyneseny. Z těchto hodnot byly vytvořeny dva grafy. První graf (viz obr. 2.12) zobrazuje změnu rozměrů v závislosti na jmenovitém rozměru u nitridovaných kusů (PŘÍLOHA 1 – 7) a druhý graf (viz obr. 2.13), který obdobně jako první graf znázorňuje změnu rozměrů v závislosti na jmenovitém rozměru, ale u cementovaných součástí (PŘÍLOHA 8 – 14). U těchto grafů nebyly uvažovány drážky a rozměry ve tvaru U. Tyto rozměry měly totiž tendenci se stahovat do sebe a jejich hodnoty by zásadně ovlivňovaly výslednou charakteristiku.

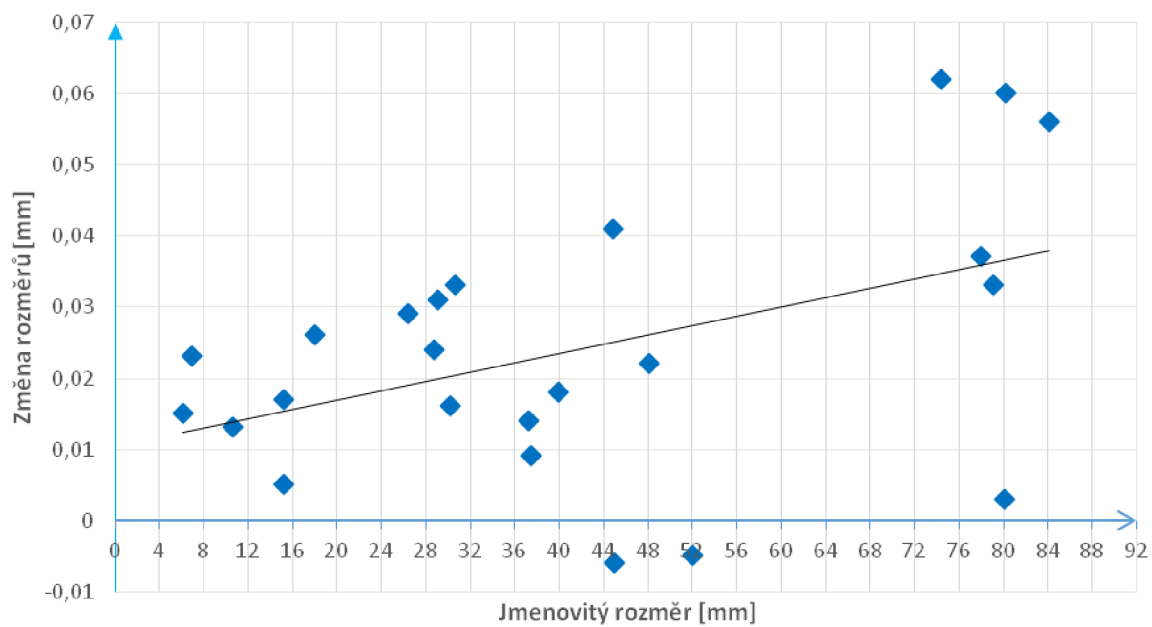
Měření skutečných kusů probíhalo obdobně jako u vzorků. Podle potřeby a rozměru byly použity výše uvedené měřicí přístroje.

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u nitridace



Obr. 2.12 Změna rozměrů v závislosti na délce u nitridovaných kusů.

Závislost změny rozměrů na jmenovitém rozměru u cementace



Obr. 2.13 Změna rozměrů v závislosti na délce u cementovaných kusů.

3 DISKUZE

3.1 Vzorky

Ve výše uvedených tabulkách (tab. 2.7-12) jsou zapsány naměřené hodnoty u jednotlivých vzorků před a po nitridaci a jejich změny rozměrů. Z tabulek je patrné, že změna rozměrů se u jednotlivých vzorků mírně liší, a to v závislosti na rozměrech a použitém materiálu.

Válečky (tab. 2.7-9)

Změna rozměrů u průměrů všech válečků, bez ohledu na materiál, byla velmi podobná. U materiálů 16MnCr5 (viz obr. 2.6) a 42CrMo4 (viz obr. 2.7) byla pozorována určitá rostoucí tendence se zvětšujícím se průměrem. Oproti tomu materiál X5CrNi 18-10 (viz obr. 2.8) vykazuje klesající tendenci.

Materiál, ze kterého byly vzorky vyrobeny, hrál větší roli při změně rozměrů u délek válečků. Tyto rozdíly jsou popsány níže dle materiálů:

Vzorky z materiálů 16MnCr5 (tab. 2.7) – zde lze pozorovat, že k největšímu nárůstu délky došlo u válečků o průměru 9 mm. U vzorků o průměrech 14 mm a 34 mm došlo přibližně ke stejnému nárůstu. Tuto nepravidelnou změnu rozměrů si lze vysvětlovat použitím odlišné třídy jakosti u jednotlivých průměrů válečků.

Vzorky z materiálů 42CrMo4 (tab. 2.8) – změny rozměrů délek u tohoto materiálu, jako u jediného, vykazují s rostoucím průměrem vzorků klesající charakter. U válečků o průměru 9 mm byl nárůst největší, a to o 0,027 mm, u průměru 14 mm byla průměrná hodnota nárůstu 0,014 mm a u průměru 34 mm hodnoty dosahovaly nárůstu už jen 0,007 mm.

Vzorky z materiálů X5CrNi 18-10 (tab. 2.9) – u těchto válečků nelze změnu délek v závislosti na průměru nijak charakterizovat. Válečky o průměrech 9 mm a 34 mm se zmenšily, zatímco válečky o průměru 14 mm se zvětšily. Tento jev je možné si vysvětlovat více možnostmi. Jednou z možností je, že u daného materiálu o obsahu uhlíku max. 0,07 %, při nitridační teplotě 495 °C dochází k fázové přeměně. Další možností může být velký obsah chromu (až 19,5 %) v materiálu, který při nitridaci zásadně ovlivňuje (zpomaluje) difuzi atomů. Ostatní materiály v porovnání s materiálem X5CrNi 18-10 mají obsah chromu do 1,2 %.

Kroužky (tab. 2.10-12)

Délky kroužků z materiálů 16MnCr5 a 42CrMo4 dosahovaly podobných hodnot nárůstu, a to u materiálu 16MnCr5 v průměru 0,014 mm, a u materiálu 42CrMo4 v průměru 0,010 mm. U vzorků z materiálu X5CrNi 18-10 měla změna rozměrů délek rostoucí tendenci. U kroužků o průměrech 15 mm došlo k nárůstu o 0,018 mm, u průměru 40 mm byla naměřena průměrná hodnota 0,023 mm a u průměru 60 mm dosahovala hodnota nárůstu až cca 0,028 mm.

Změny průměrů u kroužků z materiálů 42CrMo4 a X5CrNi 18-10 měly rostoucí tendenci (viz obr. 2.10 a obr. 2.11). U kroužků z materiálu 16MnCr5 (viz obr. 2.9) nelze změnu průměrů nijak charakterizovat. Kroužky o průměrech 15 mm a 60 mm se téměř nezměnily, zatímco u kroužků o průměrech 40 mm došlo k nárůstu. To je pravděpodobně způsobeno použitým materiálem. Materiál 16MnCr5 se prodává ve více jakostech (dle obsahu uhlíku), a lze předpokládat, že u průměru 40 mm byla použita jiná třída jakosti,

než u průměrů 15 mm a 60 mm, a ta ovlivnila výslednou změnu rozměrů. Toto tvrzení dále potvrzuje to, že vzorky o stejném průměru, které byly vyrobeny z jednoho polotovaru (materiálu o stejné jakosti), mají změnu rozměrů téměř stejnou.

3.2 Skutečné kusy

V porovnání se vzorky bylo chování skutečných kusů odlišné. Na změnu rozměrů u skutečných kusů měl zásadní vliv tvar součásti. U tvarově složitých kusů měly některé rozměry tendenci se deformovat. Nejčastěji docházelo k deformaci (smršťování) u drážek a rozměrů ve tvaru U, např. u součásti (viz příloha 6) u rozměrů (pozice) 5 a 6 došlo ke smrštění drážky. Dále pak u součásti (viz příloha 2, 3, 4, 10 a 13) u rozměrů ve tvaru U došlo také ke smrštění. Objevil se však případ (viz příloha 12), u kterého se rozměr ve tvaru U (rozměr 3) nesmrštil, ale naopak se zvětšil. To však bylo způsobeno rozměry součásti.

Z obr. 2.12 a obr. 2.13 je patrné, že s rostoucími rozměry součásti dochází i k výraznějšímu nárůstu těchto rozměrů, a to u obou druhů chemicko-tepelného zpracování. To je způsobeno vlivem chemicko-tepelného zpracování, při kterém dochází ke smršťování materiálu a zároveň k vytváření povrchové vrstvy, která materiál zvětšuje. U větších rozměrů však proti tepelnému stažení působí větší část materiálu (oceli), která smrštění zabraňuje. Toto tvrzení však zcela nepotvrzuje součást (viz příloha 14), u které došlo i přes velký rozměr ke zmenšení. To však mohla způsobit jiná jakost použitého materiálu nebo složitý tvar součásti. Z obrázku je také zřejmé, že změna rozměrů je u cementace vyšší. Cementace dosahuje nejvyšší hodnoty nad 0,06 mm, zatímco nitridace se pohybuje pod hodnotou 0,05 mm. Větší nárůst u cementace je způsoben vzniklou cementační vrstvou, která je v porovnání s nitridační větší. Z obrázků je dále patrné, že některé hodnoty se výrazně liší od ostatních, což by mohlo být způsobeno složitostí tvarů součástí, nebo jakostí použitého materiálu.

ZÁVĚR

Z hodnot naměřených u vzorků vyplývá, že nejvhodnějším materiálem pro nitridaci je materiál 42CrMo4. Pouze u tohoto materiálu byla změna rozměrů relativně stálá, a to jak u průměrů, tak i u délek. U materiálu 16MnCr5 docházelo u některých rozměrů k velkým rozdílům u jednotlivých vzorků (viz obr. 2.9). Tyto neočekávané rozdíly byly pravděpodobně způsobeny použitím jiné třídy jakosti materiálu, a lze tedy předpokládat, že pokud by byl používán stále stejný materiál o stejné jakosti, tak by materiál 16MnCr5 vykazoval podobné chování jako materiál 42CrMo4. Doporučil bych se touto problematikou dále zabývat. Jako nejméně vhodný se pro nitridaci jeví materiál X5CrNi 18-10, u kterého docházelo u válečků k nepravidelné změně délek v závislosti na průměru. Další nevýhodou je, že materiál obsahuje velké množství chromu (až 19,5 %). Ten během nitridace zpomaluje difuzi atomu a nově vzniklá nitridační vrstva nedosahuje velké hloubky (viz tab. 2.6).

Po změření skutečných kusů, z nichž některé byly nitridovány, a některé cementovány, lze říci, že změna rozměrů je u cementovaných součástí větší než u nitridovaných (viz obr. 2.12 a obr. 2.13). Větší změnu rozměrů u cementace je možné si vysvětlit tím, že vrstva vzniklá cementací je mnohem větší, než vrstva vzniklá nitridací. Z výše uvedených obrázků je také zřejmé, že s rostoucím rozměrem součástí dochází k větší změně rozměrů. Dalším faktorem ovlivňujícím změnu rozměrů je tvar součástí. Z příloh je patrné, že u některých tvarově složitějších součástí docházelo k deformaci (borcení). Ke zmenšení rozměrů docházelo nejčastěji u drážek a rozměrů ve tvaru U.

Při chemicko-tepelném zpracování je tedy potřeba vzít v úvahu hned několik faktorů, které ovlivňují výsledek procesu. Nejdůležitějším faktorem je materiál. Z praktické části se jeví jako nejlepší materiál 42CrMo4. V případě použití materiálu 16MnCr5 je vhodné kupovat stále stejnou třídu jakosti. Dalším důležitým faktorem je tvar součástí, který zásadně ovlivňuje výslednou změnu rozměrů. Posledním faktorem je druh chemicko-tepleného zpracování. U různých druhů se během procesu dosahuje jiných teplot, které mají také vliv na danou součást.

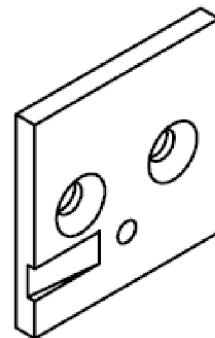
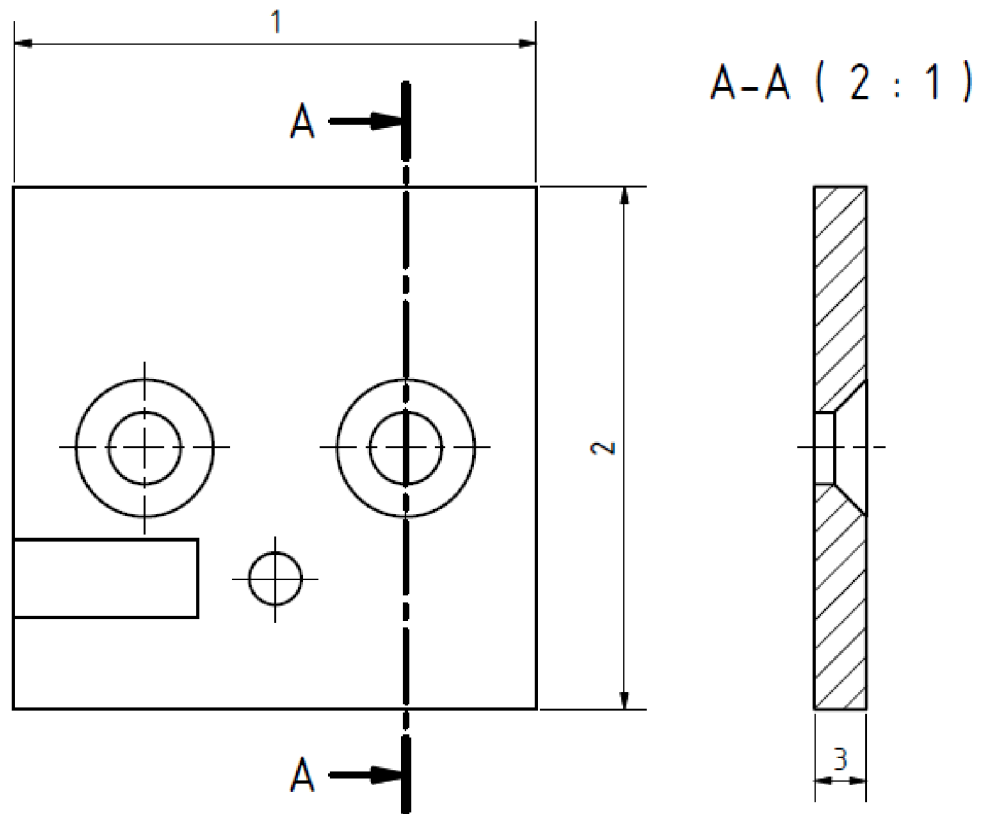
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ZÁBAVNÍK, Viktor. *Chemicko - tepelné spracovanie kovov*. Košice: Technická univerzita, [1998], 141 s.
- [2] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II*. Brno: CERM, 1999, 350 s. ISBN 80-7204-130-4.
- [3] KLIMČÁKOVÁ, K. *Výzkum a vývoj povrchových úprav ložiskových ocelí metodou iontové nitrídace*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 59 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Doležal, Ph.D.
- [4] PÍŠEK, D. *Chemicko-tepelné zpracování ocelí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Karel Němec, Ph.D.
- [5] *Oficiální výukové stránky Ústavu materiálových věd a inženýrství FSI VUT* [online]. 2016 [cit. 2016-2-13]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/04%20-%20Druhy%20a%20způsob%20TZ.ppt
- [6] Tumlikovo: Nitridování povrchu nástrojů. *Tumlikovo.cz* [online]. 2011 [cit. 2016-02-23]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/nitridovani-povrchu-nastroju/>
- [7] *Bodycote* [online]. [cit. 2016-02-25]. Dostupné z: <http://www.bodycote.cz/cs-CZ/services/heat-treatment/case-hardening-without-subsequent-hardening-operation/gas-nitriding.aspx>
- [8] HOLEMÁŘ, Alois a Vojtěch HRUBÝ. *Iontová nitrídace v praxi*. 1. vyd. Praha: SNTL, 1989. ISBN 80-03-00001-7.
- [9] *Böhler Uddeholm CZ s.r.o.* [online]. [cit. 2016-02-28]. Dostupné z: <http://www.kalirna-vyskov.cz/technologie/plazmova-nitridace>
- [10] *Bolzano* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-cementovani-podle-en-10084/prehled-vlastnosti-oceli-16mncr5>
- [11] *Bolzano* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/tycove-oceli-uhlikove-konstrukcni-a-legovane/oceli-k-zuslechtovani-podle-en-10083-1/prehled-vlastnosti-oceli-42crmo4>
- [12] *Bolzano* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.bolzano.cz/cz/technicka-podpora/technicka-prirucka/vyroby-z-korozivzdornych-a-zaruvzdornych-oceli/vyroby-z-oceli-korozivzdornych/materialove-listy/x6crni18-10-austeniticke>
- [13] *Inox* [online]. [cit. 2016-03-02]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14301.html>

[14] *ZEISS* [online]. [cit. 2016-03-12]. Dostupné z: http://www.zeiss.cz/industrial-metrology/cs_cz/produkty/systemy/bridge-type-cmms/prismo-navigator.html

PŘÍLOHA 1

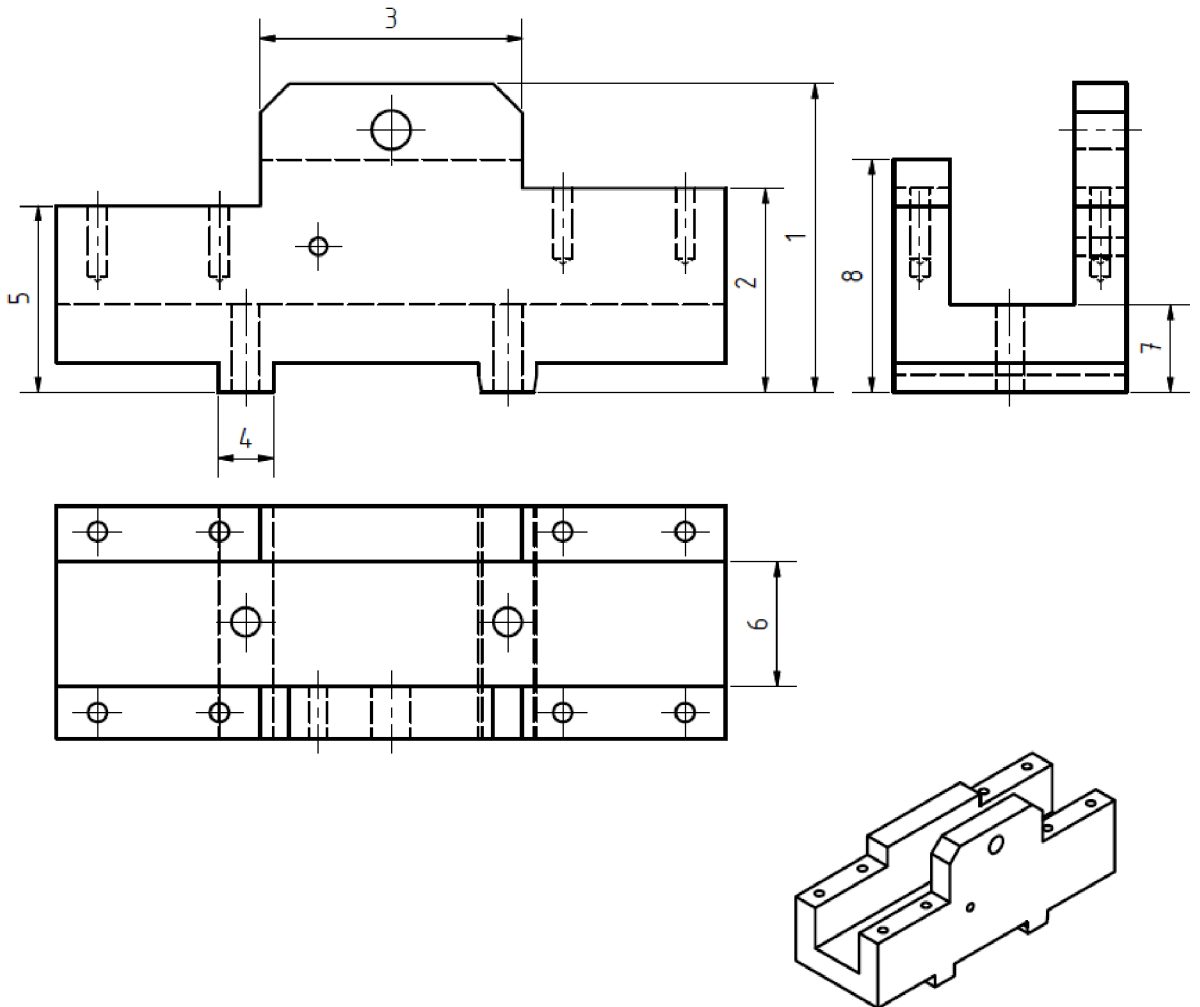
(Nitridace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridací	Změna rozměrů
1	39,978	40,016	+0,038
2	39,993	40,017	+0,024
3	4,018	4,013	-0,005

PŘÍLOHA 2

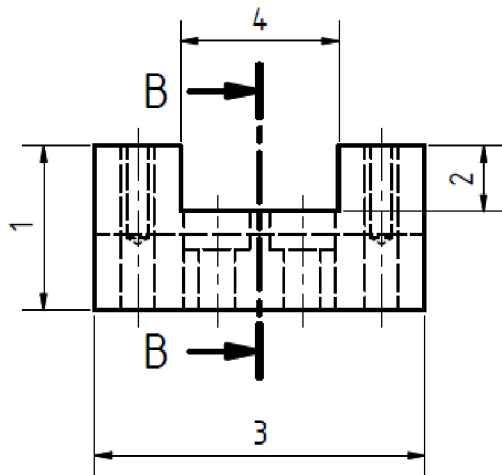
(Nitridace)



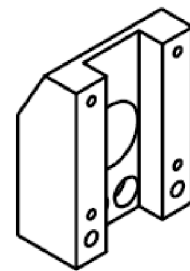
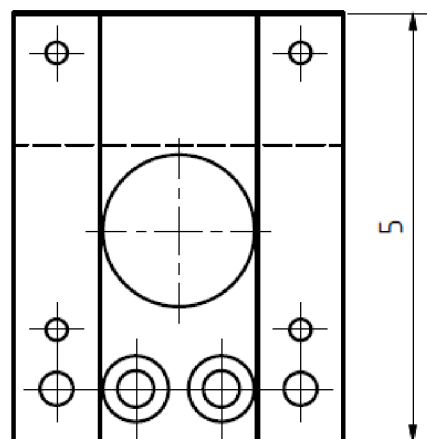
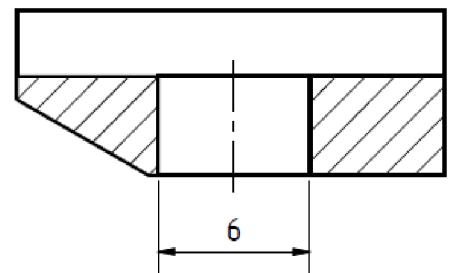
Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridací	Změna rozměrů
1	53,078	53,084	+0,006
2	35,017	35,026	+0,009
3	44,970	44,999	+0,029
4	9,514	9,524	+0,010
5	32,061	32,068	+0,007
6	22,051	22,017	-0,034
7	14,979	14,965	-0,014
8	39,990	39,996	+0,006

PŘÍLOHA 3

(Nitridace)



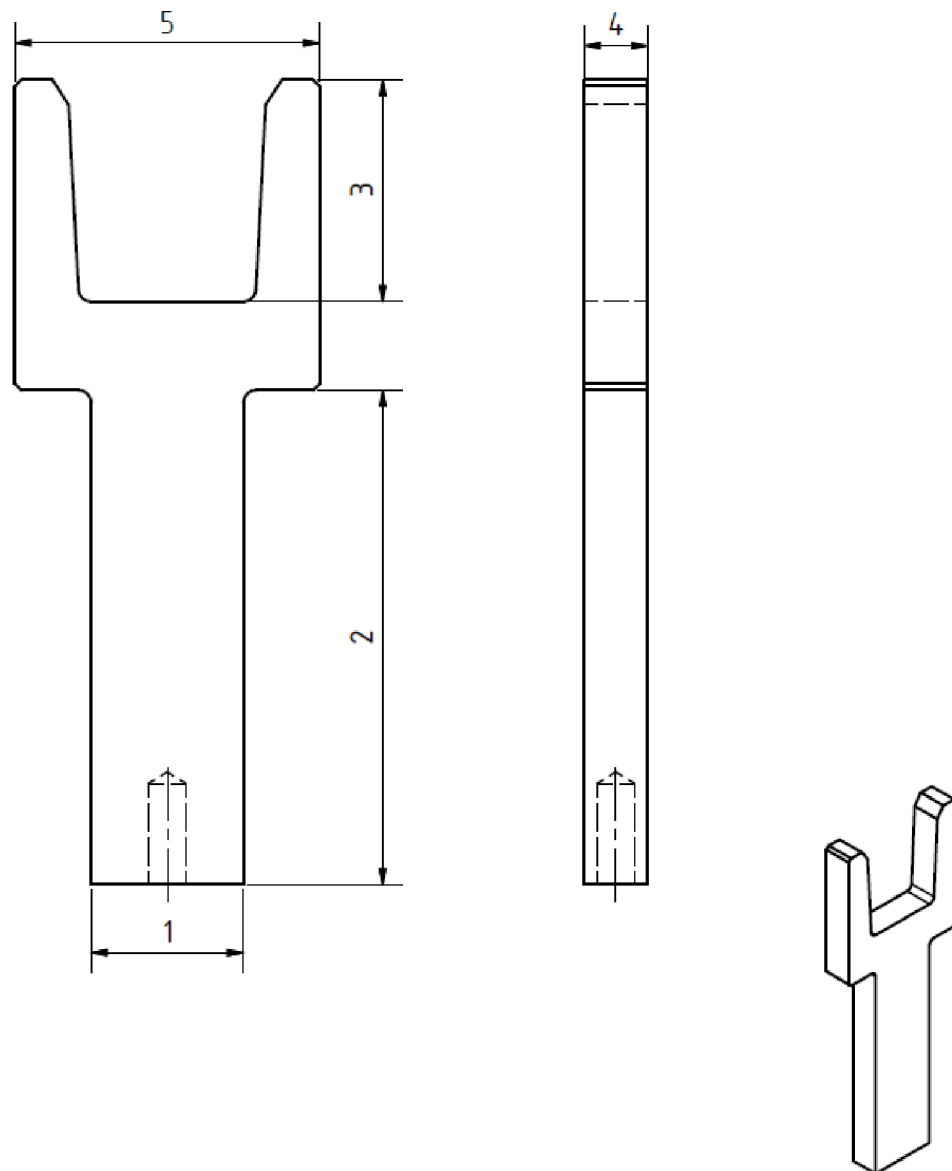
B-B (1 : 1)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridaci	Změna rozměrů
1	25,273	25,292	+0,019
2	9,967	9,977	+0,010
3	50,163	50,187	+0,024
4	23,477	23,472	-0,005
5	65,063	65,109	+0,046
6	Ø 23,101	Ø 23,110	+0,009

PŘÍLOHA 4

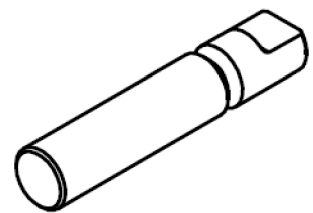
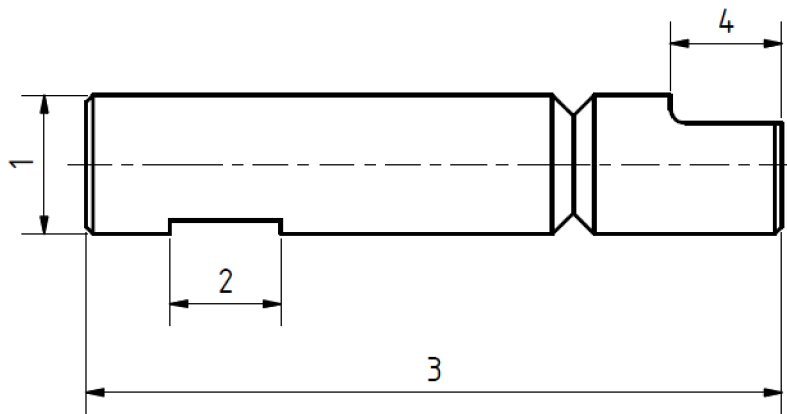
(Nitridace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridací	Změna rozměrů
1	24,304	24,313	+0,009
2	78,111	78,013	-0,098
3	34,983	35,020	+0,037
4	10,292	10,311	+0,019
5	48,145	48,016	-0,129

PŘÍLOHA 5

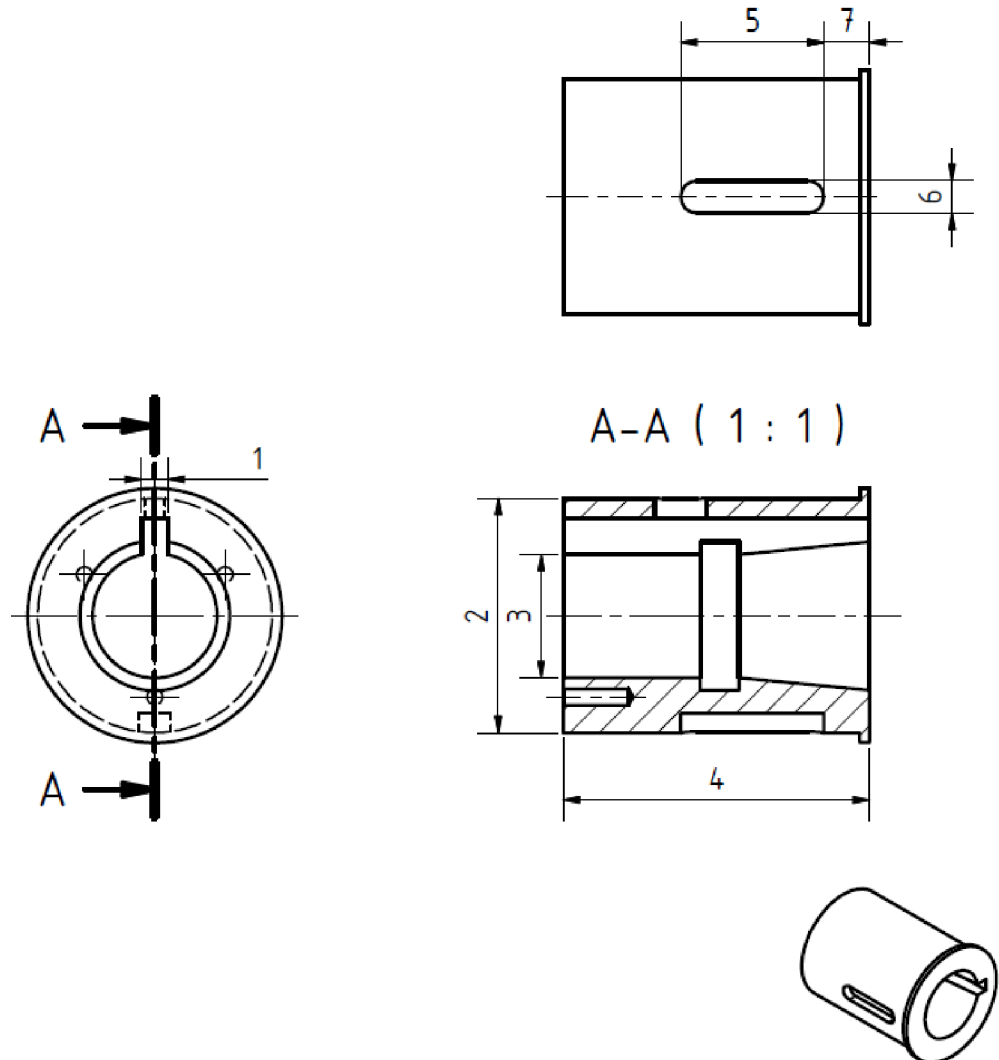
(Nitridace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridaci	Změna rozměrů
1	Ø 9,991	Ø 10,000	+0,009
2	8,172	7,990	-0,182
3	50,024	50,031	+0,007
4	7,883	7,884	+0,001

PŘÍLOHA 6

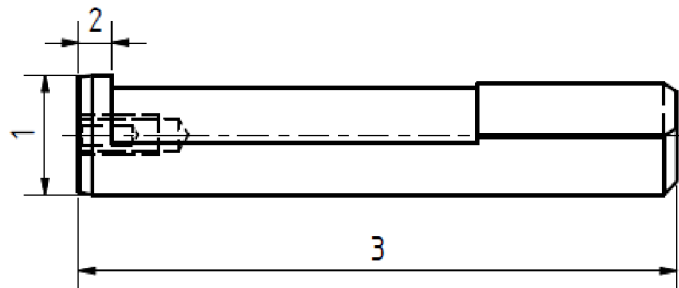
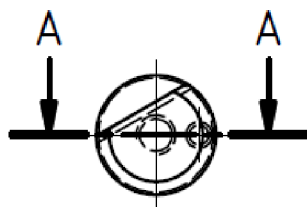
(Nitridace)



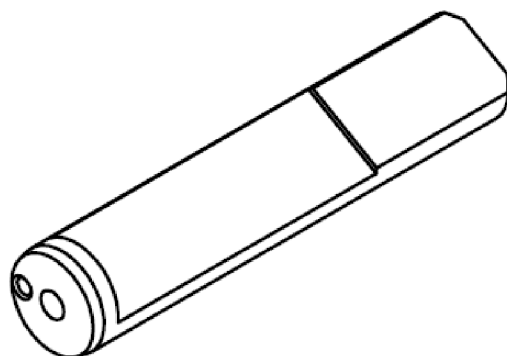
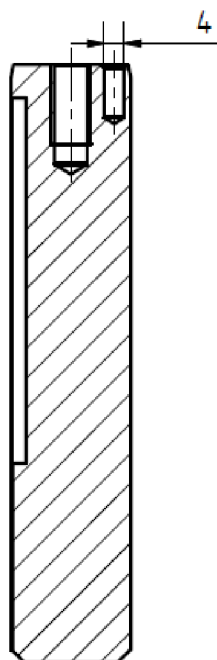
Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridaci	Změna rozměrů
1	3,600	3,570	-0,030
2	Ø 36,247	Ø 36,273	+0,026
3	Ø 19,683	Ø 19,704	+0,021
4	47,194	47,219	+0,025
5	22,120	22,057	-0,063
6	4,800	4,730	-0,070
7	7,020	7,052	+0,032

PŘÍLOHA 7

(Nitridace)



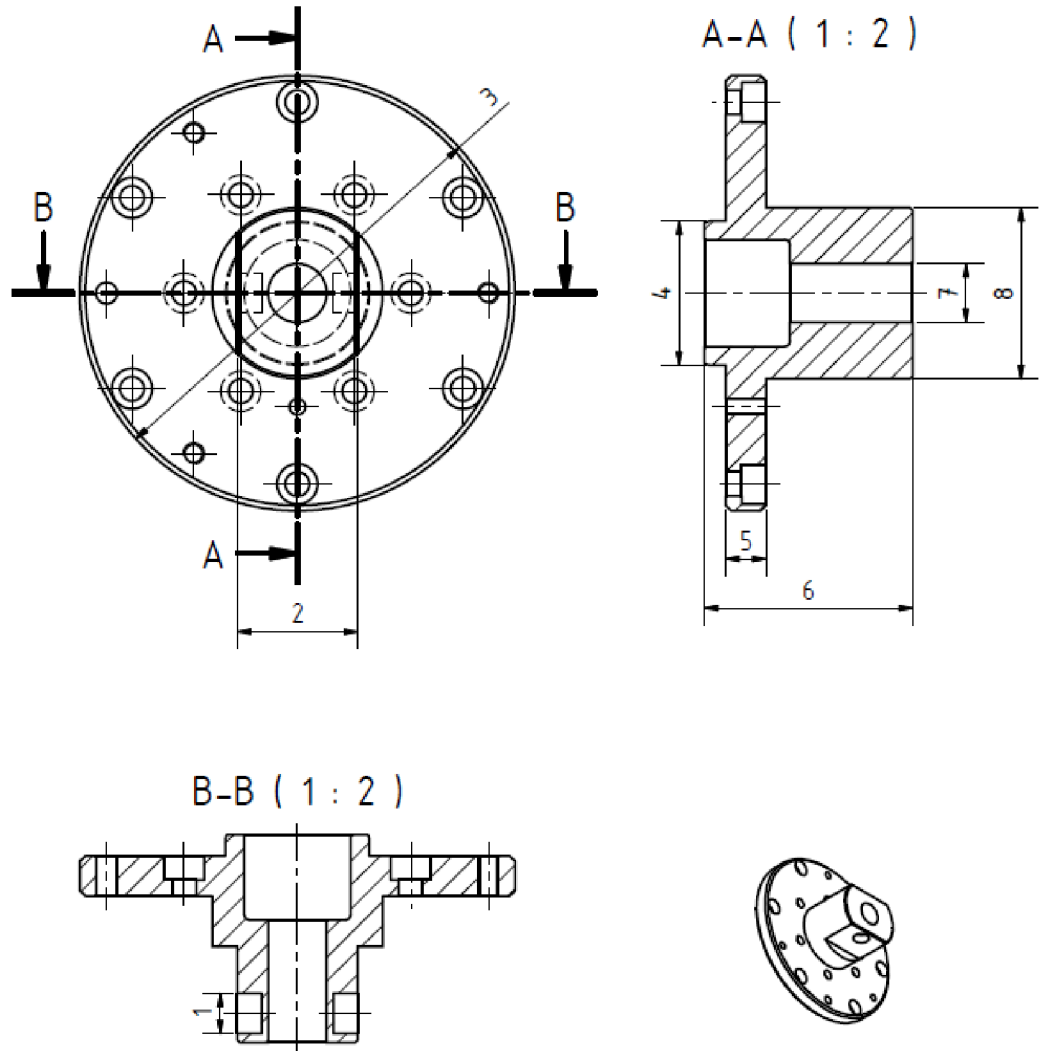
A-A (1 : 1)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před nitridací	Po nitridací	Změna rozměrů
1	Ø 17,970	Ø 17,975	+0,005
2	4,834	4,845	+0,011
3	90,123	90,139	+0,016
4	Ø 3,009	Ø 3,008	-0,001

PŘÍLOHA 8

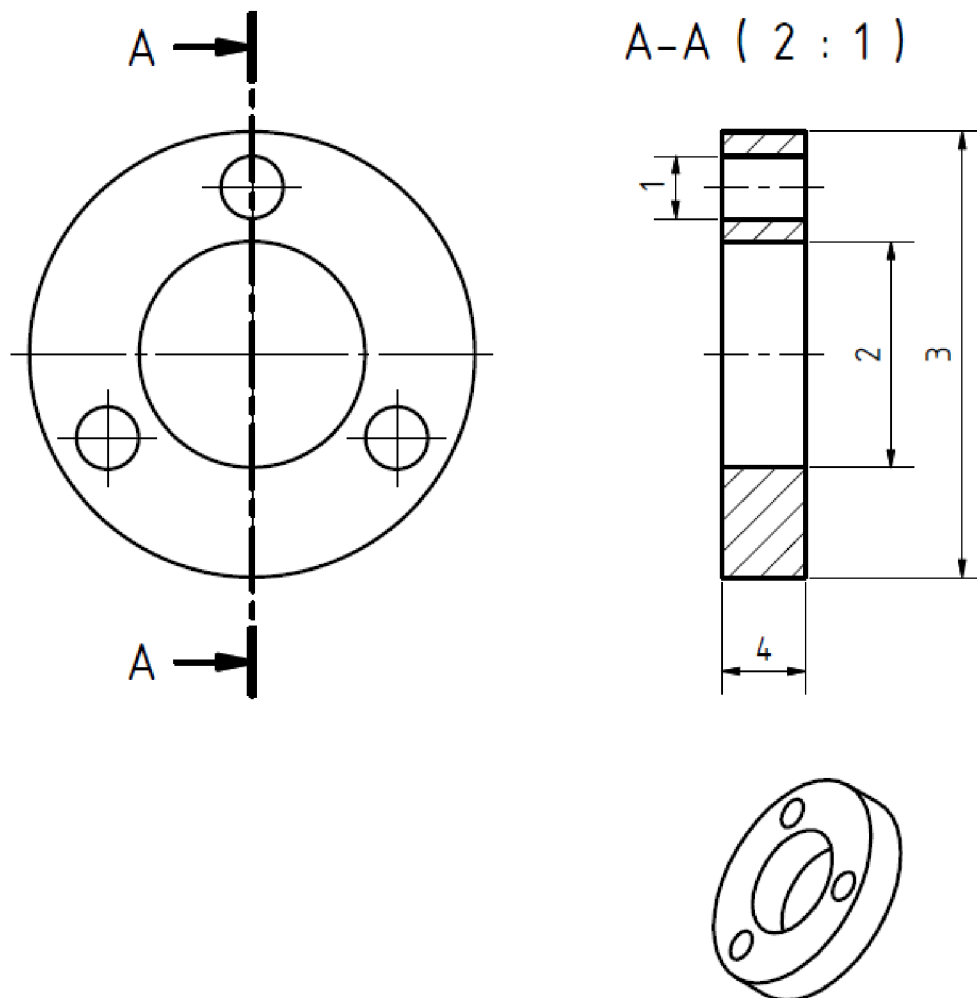
(Cementace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementací	Změna rozměrů
1	Ø 14,861	Ø 14,855	-0,006
2	44,898	44,939	+0,041
3	Ø 163,053	Ø 163,042	-0,011
4	Ø 54,328	Ø 54,353	+0,025
5	15,255	15,272	+0,017
6	77,975	78,012	+0,037
7	Ø 21,701	Ø 21,715	+0,014
8	Ø 64,329	Ø 64,305	-0,024

PŘÍLOHA 9

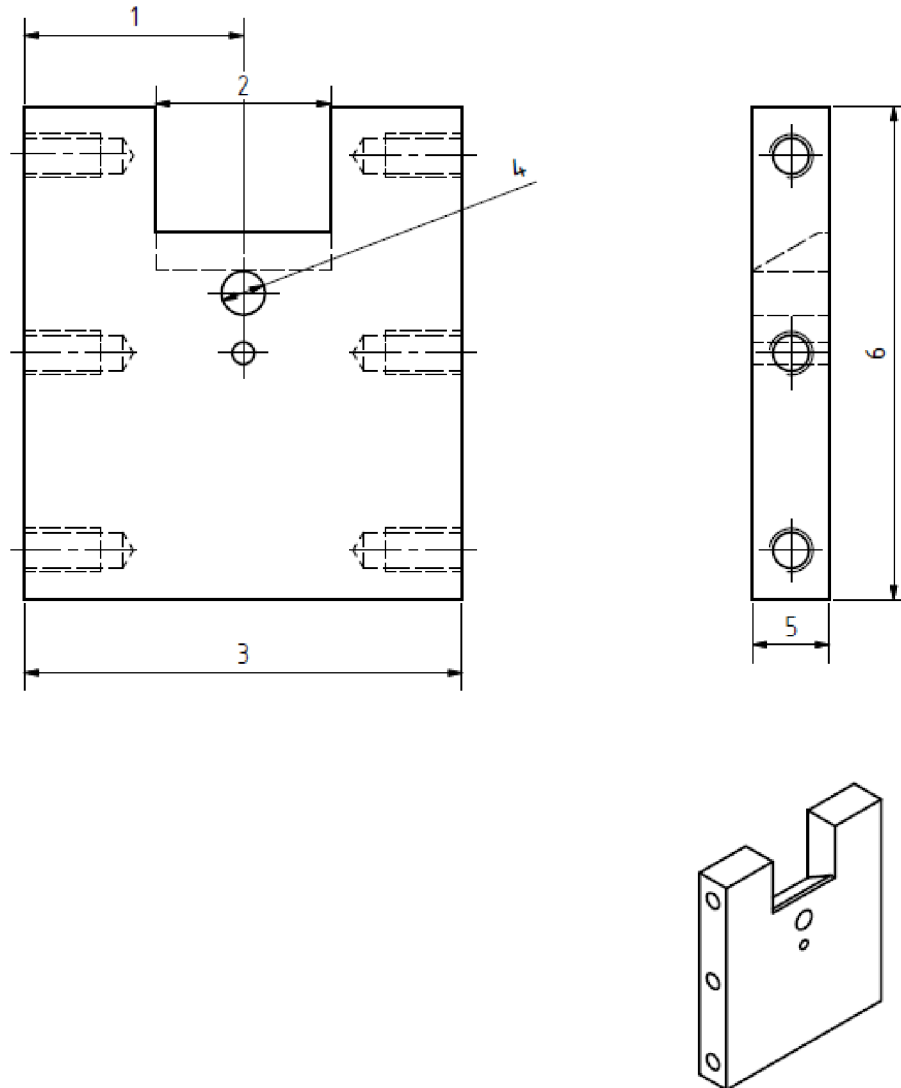
(Cementace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementací	Změna rozměrů
1	Ø 4,936	Ø 4,949	+0,013
2	Ø 16,192	Ø 16,147	-0,045
3	Ø 32,005	Ø 32,006	+0,001
4	6,108	6,123	+0,015

PŘÍLOHA 10

(Cementace)

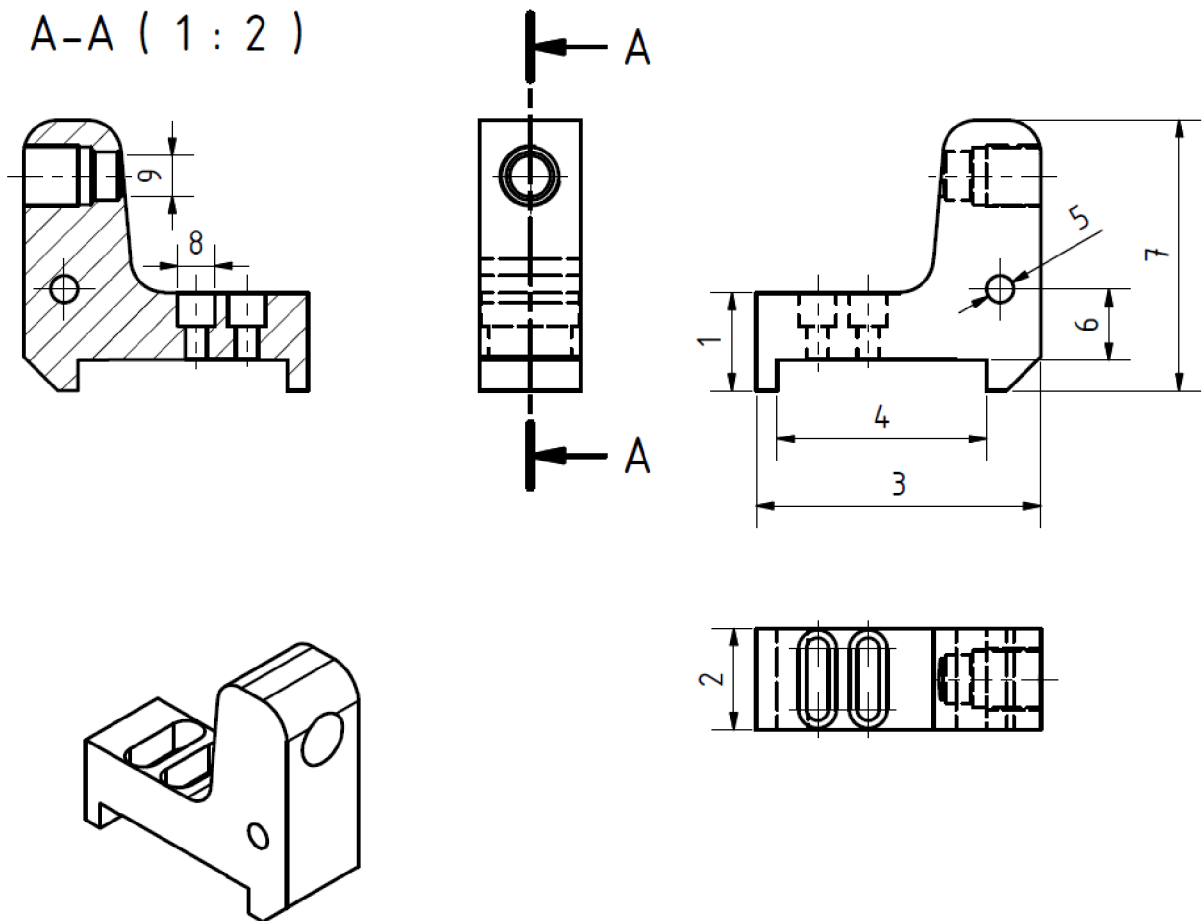


Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementací	Změna rozměrů
1	19,959	20,025	+0,066
2	16,024	15,983	-0,041
3	39,992	40,010	+0,018
4	Ø 4,018	Ø 4,001	-0,017
5	6,948	6,971	+0,023
6	45,024	45,018	-0,006

PŘÍLOHA 11

(Cementace)

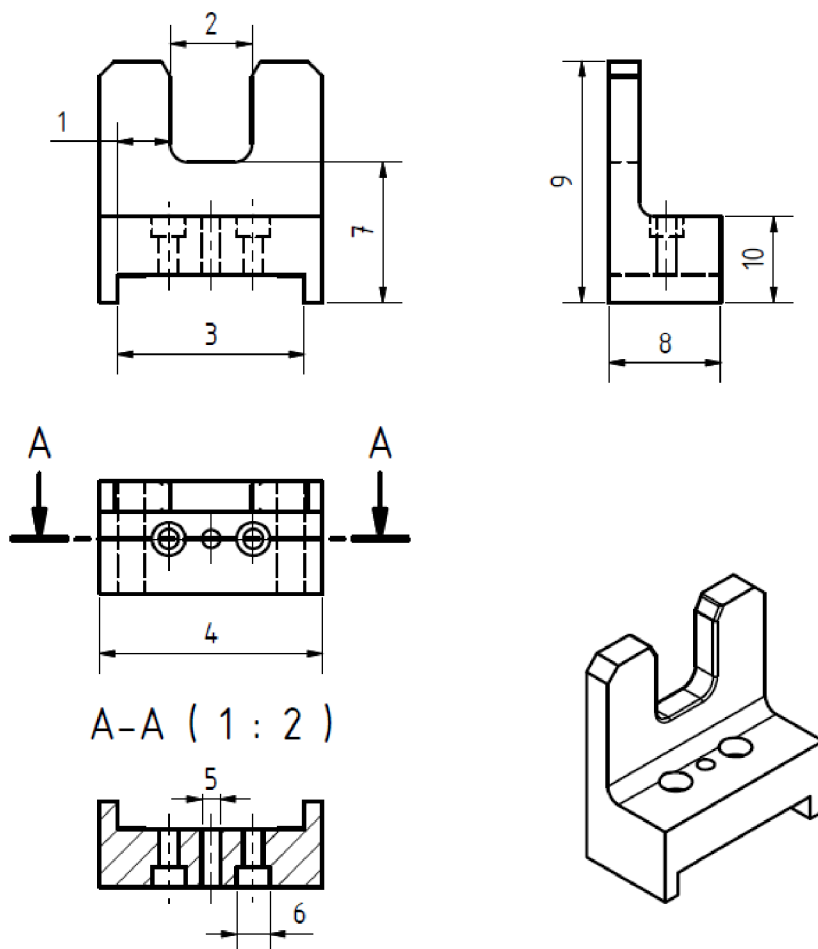
A-A (1 : 2)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementaci	Změna rozměrů
1	29,062	29,093	+0,031
2	30,214	30,230	+0,016
3	84,146	84,202	+0,056
4	61,596	61,526	-0,070
5	Ø 7,790	Ø 7,784	-0,006
6	21,153	21,132	-0,021
7	79,147	79,180	+0,033
8	Ø 10,979	Ø 10,953	-0,026
9	Ø 12,456	Ø 12,447	-0,009

PŘÍLOHA 12

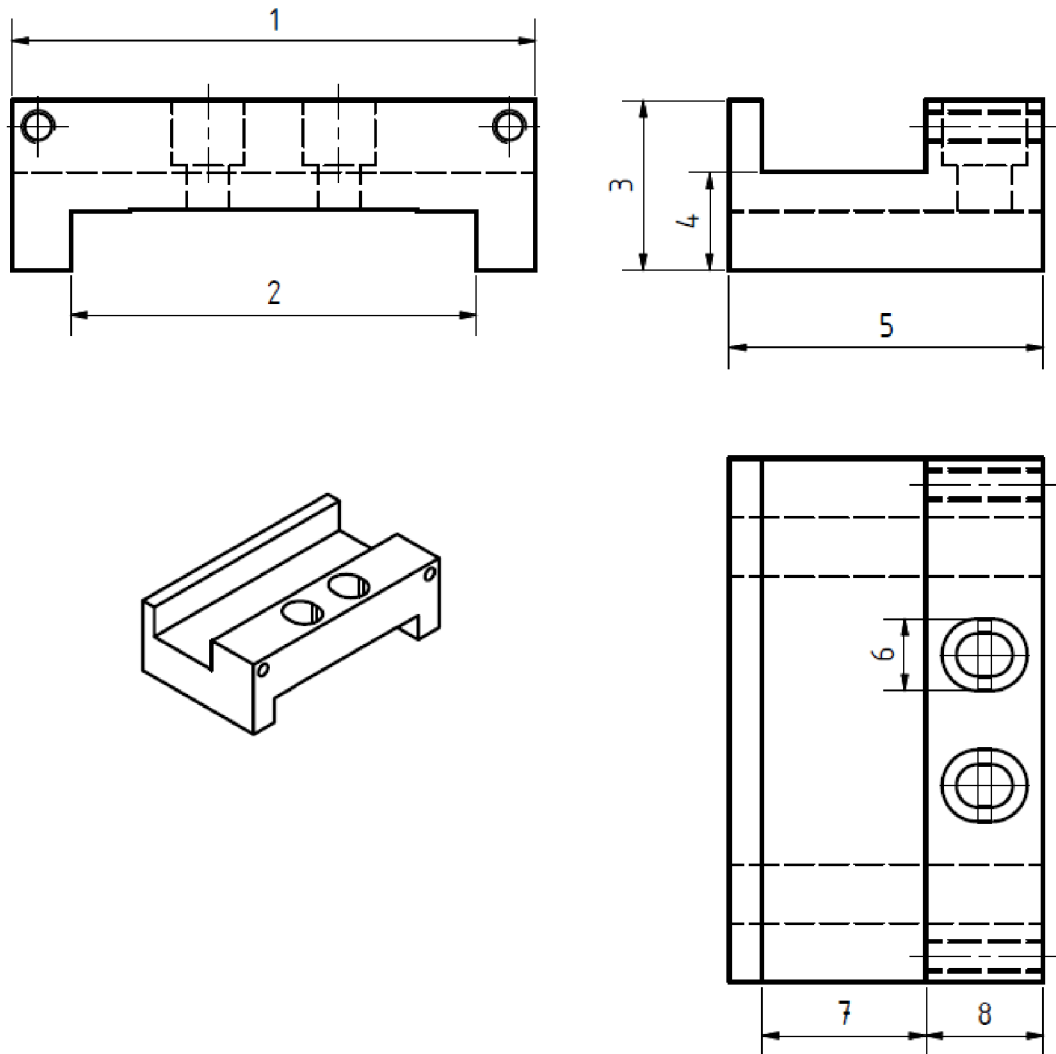
(Cementace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementací	Změna rozměrů
1	17,455	17,396	-0,059
2	26,727	26,704	-0,023
3	61,543	61,605	+0,062
4	74,353	74,415	+0,062
5	Ø 5,867	Ø 5,825	-0,042
6	Ø 11,205	Ø 11,152	-0,053
7	37,491	38,000	+0,009
8	37,243	37,257	+0,014
9	80,232	80,292	+0,060
10	28,761	28,785	+0,024

PŘÍLOHA 13

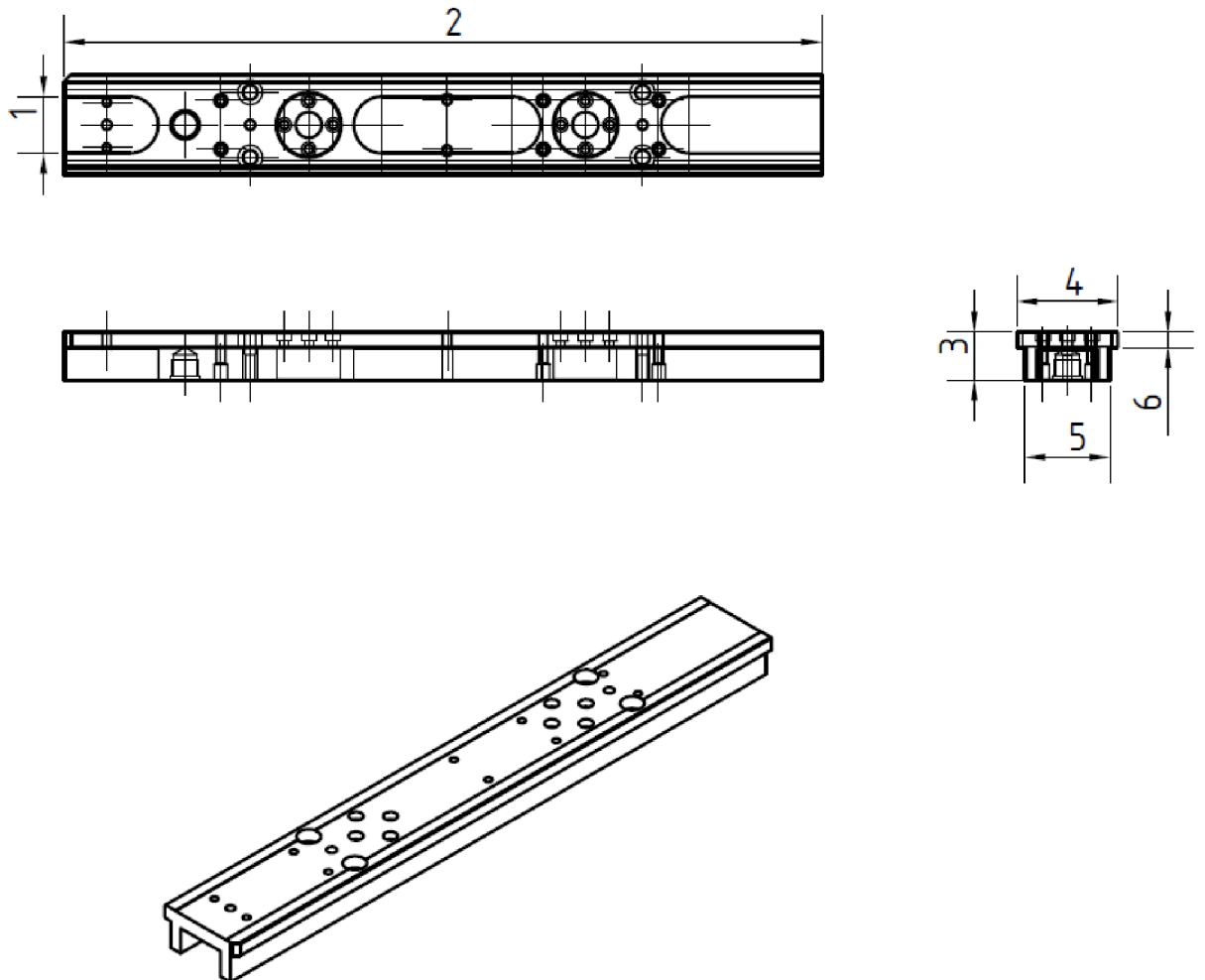
(Cementace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementací	Změna rozměrů
1	80,079	80,082	+0,003
2	61,451	61,448	-0,003
3	26,353	26,382	+0,029
4	15,184	15,189	+0,005
5	48,071	48,092	+0,022
6	10,961	10,939	-0,022
7	25,120	25,101	-0,019
8	18,020	18,046	+0,026

PŘÍLOHA 14

(Cementace)



Rozměry (pozice)	Materiál: 16MnCr5 (14 220)		
	Naměřené hodnoty		
	Před cementací	Po cementaci	Změna rozměrů
1	34,915	34,911	-0,004
2	464,968	464,957	-0,011
3	30,673	30,706	+0,033
4	62,623	62,606	-0,017
5	51,976	51,971	-0,005
6	10,659	10,672	+0,013