



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ZVYŠOVÁNÍ ŽIVOTNOSTI STŘIŽNÝCH NOŽŮ

INCREASING THE LIFE OF CUTTING BLADES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Marie Rohlínková

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Kamil Podaný, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Studentka: **Marie Rohlínková**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Kamil Podaný, Ph.D.**
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:

Zvyšování životnosti střížných nožů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o zpracování literární studie možností prodloužení životnosti střížných nožů. Rešerše bude obsahovat rozbor možností, principy, výhody a nevýhody. Součástí práce bude měření tvrdosti se zhodnocením.

Cíle bakalářské práce:

- provést průzkum vhodných metod pro zvyšování životnosti nožů
- popsat principy
- zhodnotit využitelnost a problémy
- provést měření tvrdosti dodaných vzorků
- práci doplnit obrázky, vlastními úvahami a závěry

Seznam literatury:

HOSFORD, William F. and Robert M. CADDEL. Metal Forming: Mechanics and Metalurgy. 3th ed. New York: Cambridge University Press, (2007) 365 s. ISBN 978-0-521-88121-0.

SCHULER GMBH. Handbuch der Umformtechnik. Berlin Heidelberg: Springer, (1996) 565 s. ISBN 35-406-1099-5.

SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. Speciální technologie tváření. Vydání 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, (2010-2011) 2 sv. (134, 155 s.). ISBN 978-80-214-4406-52.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření. Brno: RVO VA, (1994) 214 s.

KOTOUČ, Jiří, Jan ŠANOVEC, Jan ČERMÁK a Luděk MÁDLE. Tvářecí nástroje. vydání první. Praha: Vydavatelství ČVUT (1993) 349 s. ISBN 80-010-1003-1.

STANĚK, Jiří. Základy stavby výrobních strojů: Tvářecí stroje. 1. vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, (2001) ISBN 80-7082-738-6.

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

ROHLÍNKOVÁ Marie: Zvyšování životnosti střížných nožů.

Práce navrhuje možné metody zvýšení životnosti střížného nože, který je z materiálu 19 733 a je použit ke stříhání statorových plechů z křemíkového materiálu. Zmíněné plechy jsou velmi tvrdé a na nástroj jsou tak kladeny zvýšené nároky na střížné hraně. Po literární studii byla jako optimální metoda zvolena plasmová nitridace, která umožňuje zvýšení tvrdosti povrchu až na 64 HRC. Zvýšení tvrdosti povrchu a zachování houževnatosti jádra je potvrzeno experimentálním měřením tvrdosti. Pro měření jsou použity dva vzorky jeden neupravený a druhý nitridovaný. Z metalografického výbrusu je patrné, že tloušťka nitridované vrstvy je 0,1 mm.

Klíčová slova: Stříhání, střížný nástroj, životnost, plasmová nitridace

ABSTRACT

ROHLÍNKOVÁ Marie: Increasing the life of cutting blades.

Thesis suggest possible methods of increasing the life of a cutting blade, which is made of steel 19 733 and is used for cutting stator laminations from silicon materials. Mentioned metal sheets are very hard which leads to higher demands on cutting blades. The optimal method chosen, as based on studies of relevant literature, was ion nitriding which provides increase in surface hardness to 64 HRC. Increase in surface hardness while also preserving the toughness of the core was further confirmed by an experimental measurement of hardness, which was measured on two samples. First sample was left in the original state and the second sample was ion nitrided. According to the scratch pattern the thickness of nitrided layer is 0.1 mm.

Keywords: Cutting, cutting tool, lifetime, ion nitriding,

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ROHLÍNKOVÁ, Marie. *Zvyšování životnosti střížných nožů*. Brno, 2015. 28s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů . Vedoucí práce Ing. Kamil Podaný, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 27.5.2016

.....

Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Kamilu Podanému, PhD. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce, panu Vojtěchu Řiháčkovi za nemalou pomoc při měření tvrdosti a společnosti Siemens za poskytnutí podkladů a materiálů. Dále děkuji rodině a kolegům za projevenou podporu a trpělivost.

OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

ÚVOD	9
-------------	---

1 SOUČASNÝ STAV	10
------------------------	----

1.1 Možnosti zvýšení životnosti	11
---------------------------------	----

2 PLASMOVÁ NITRIDACE	17
-----------------------------	----

2.1 Iontonitridační zařízení	20
------------------------------	----

3 EXPERIMENT	24
---------------------	----

4 ZÁVĚRY	28
-----------------	----

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratek

Seznam obrázků

Seznam tabulek

ÚVOD [3; 9; 19; 26]

Dělení materiálu je jednou z nejdůležitějších strojírenských technologií a alespoň jednoho zástupce má v každém výrobním procesu. Z tak vysokého počtu aplikací vyplynula široká škála metod, z nichž nejvariabilnější je stříhání. Se stříháním se lze setkat při dělení hutního materiálu velkými strojními nůžkami, u přesného vystřihování statorových plechů (obr. 1), ale i na finální montáži výrobků. Vzhledem k četnosti použití, je pak z ekonomického hlediska životnost střížného nástroje neopominutelným faktorem. Příklad střížného nástroje je na obrázku 2.

S neustávajícím vývojem strojírenství a neustálým posouváním hranic nemožného, rostou požadavky na výrobky a tudíž i na stroje a nástroje. K dosažení co nejvyšší životnosti, je nutno posunovat mechanické charakteristiky za meze materiálových vlastností. Je nutno materiály kombinovat a to v celém objemu nástroje, jako je tomu u břitových destiček ze slinutých karbidů, které jsou na obrázku 3, nebo modifikací chemického složení pouze na povrchu. Toho lze docílit nasycením povrchových vrstev vhodným prvkem nebo implementací úplně jiného materiálu, jako je tomu u povlakovaného nástroje na obrázku 4.



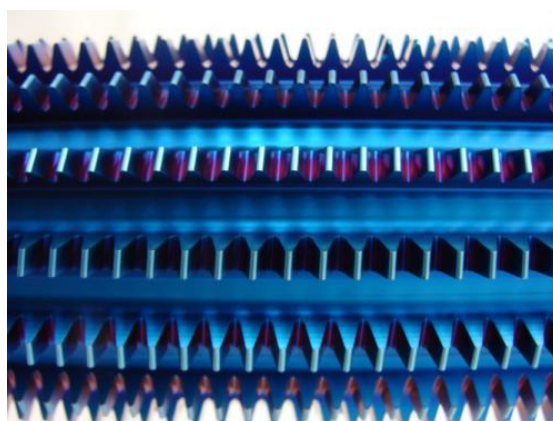
Obr. 1 Stříhání statorových plechů [9]



Obr. 2 Střížný nástroj [26]



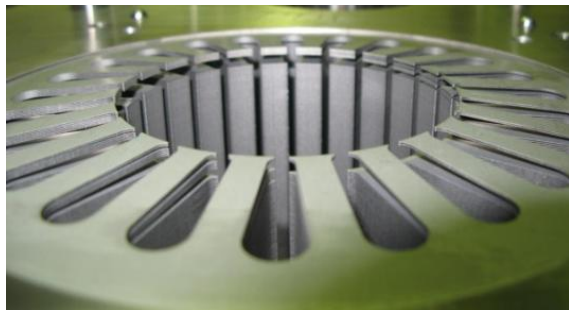
Obr. 3 Břitové destičky z SK [19]



Obr. 4 Povlakovaná odvalovací fréza [3]

1 SOUČASNÝ STAV [2; 4; 5; 6; 7; 11; 12; 14; 15; 16; 17; 18; 21; 20; 22; 23; 24; 25; 27]

Nejvýznamější částí elektromotoru je vinutí vložené do magnetického obvodu, u asynchronních motorů je to vinutý stator a rotor, který může být s kotvou nakrátko nebo kotvou kroužkovou. Stator, jehož typický tvar je na obrázku 5 je, z důvodu omezení vzniku výřivých proudů, tvořen vzájemně izolovanými plechy. Statorové plechy se lisují z tabulí



Obr. 5 Tvar statorových plechů [7]

nebo pásů, kdy prvním krokem je vystřížení kruhového mezikruží a pokračuje se lisováním drážek. U malých strojů se toto děje jediným postupovým stříhadlem. U větších se vystřihují drážkované segmenty o velikosti čtvrtiny nebo šestiny daného mezikruží. Právě tato technologie je použita ve společnosti Siemens Electric Machines. Při malé četnosti lze použít i modernější metody, kdy se celý tvar plechu vyřeže laserem případně vodním paprskem.

Siemens Electric Machines Drásov se v různých podobách pohybuje na trhu již od roku 1913. Původně se jednalo o závod opravující elektrické motory, jejich výroba se zde začala až později. Po znárodnění byl roku 1950 začleněn do skupiny MEZ a společností Siemens byl koupen roku 1997. V roce 2006 byla vybudována nová hala, celý areál je na obrázku 6. V současnosti se společnost Siemens Electric Machines zabývá vývojem, výrobou a prodejem synchronních generátorů a synchronních a asynchronních motorů. Jejich stroje nacházejí své uplatnění v lodní dopravě, na ropných plošinách, v lokomotivách a dalších průmyslových aplikacích.



Obr. 6 Areál výrobního závodu Siemens Electric Machines Drásov [22]

Pro výrobu elektromotorů je polotovár vystřihován z tzv. transformátorových plechů. Tento pojem označuje válcovanou železo-křemíkovou ocel s definovanými magnetickými vlastnostmi, tj. definovaná magnetizační charakteristika a ztrátové číslo. Zvýšená koncentrace křemíku snižuje ztráty v železe (hysterezními a vířivými proudy), to je žádoucí z hlediska elektromagnetických vlastností motoru, ale také zvyšuje tvrdost a křehkost materiálu, což zvyšuje nároky na lisovací nástroje. Tloušťka plechu bývá tradičně 0,5 mm, u méně důležitých aplikací lze použít 0,65 mm, naopak u vysokootáčkových motorů může být tloušťka plechu i 0,33 mm. Mez pevnosti těchto materiálů se pohybuje mezi 290 a 470 MPa a tvrdost od 130 do 220 HV^[2].

Stříhání komplikovaných tvarů z tak tvrdého materiálu má svá úskalí a je nutno životnosti nástroje věnovat zvýšenou pozornost. Aktuálně jsou stříhadla vyrobena z oceli 19 436 a pro větší série 19 733. Právě z tohoto materiálu byl dodán vzorek na kterém byla aplikována vybraná metoda zvýšení životnosti. Jedná se o rázuvzdorný materiál s 0,5 % C, 1 % Si, 1,5 % Cr a 2,5 % W s mezí pevnosti kolem 2 300 MPa. Použití této oceli na střížníky se doporučuje, hrozí-li nebezpečí prasknutí a používá se pro práci za studena i za tepla. K dosažení co nejlepších vlastností výsledného nástroje se materiál zušlechťuje. Tento proces se skládá z kalení a následného vícenásobného popouštění. Kalicí teploty jsou 890 – 920 °C a popouští se z 150 – 250 °C na 56 HRC. Při tak vysoké tvrdosti v celém objemu ovšem může docházet k vyštipování funkčních hran nože. Při stříhání měkkého ocelového polotovaru o tloušťce do 1,5 mm lze předpokládat životnost 100 000 stříhů^[20].

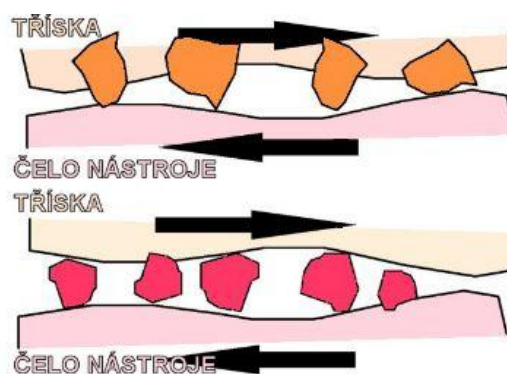
1.1 Možnosti zvýšení životnosti [4; 5; 6; 11; 12; 14; 15; 16; 17; 18; 21; 20; 23; 24; 25; 27]

K opotřebení u střížných nástrojů dochází v povrchových vrstvách a projevuje se změnou kvality funkčního povrchu nebo změnou geometrie nástroje. Mezi hlavní mechanismy patří adhezivní a abrazivní opotřebení.

- Adhezivní opotřebení - vlivem vysokého tlaku a teploty vznikají a okamžitě jsou porušovány mikrosvary na vrcholcích nerovností stykových povrchů po sobě se přesouvajících materiálů. K tomuto způsobu opotřebení dochází u chemicky příbuzných materiálů a materiálů s kovově čistými styčnými povrchy, viz obrázek 7. Adhezi lze zmírnit použitím maziva, které vytvoří mezi nástrojem a stříhaným materiálem ochranný film.
- Abrazivní opotřebení - vzniká brusným otěrem tvrdých částic povrchu druhého tělesa nebo odřezáváním mikrotřísek z povrchu nástroje, viz obrázek 8. Je charakteristické postupným úbytkem materiálu nástroje. K abrazivnímu opotřebení přispívají i vnější nečistoty a nečistoty obsažené v mazivu. Odolnost materiálu vůči abrazi je označována jako otěruvzdornost.

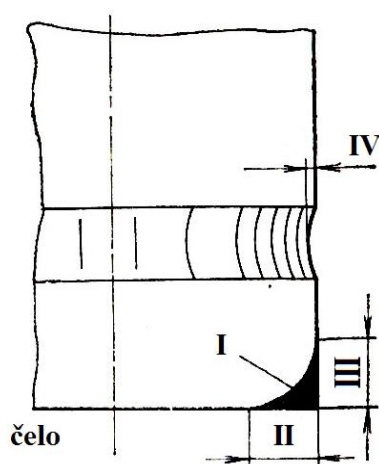


Obr. 7 Adhezivní opotřebení [12]



Obr. 8 Abrazivní opotřebení [12]

Ke změně geometrie dochází na hraně a čele nástroje. Opotřebení hrany je z hlediska funkčnosti nejdůležitější a projevuje se zaoblením. Zaoblení hrany pomyslně zvětšuje střížnou vůli, tím se zvětšuje stupeň deformace stříhaného materiálu, jeho zpevňování a oddaluje vznik počáteční trhliny a následného oddělení výstřížku. Na stupni zpevnění závisí i tvar a velikost ostřiny. Otupený nástroj pak potřebuje k prostřížení materiálu až o 100% větší sílu než nástroj ostrý. Na střížné hraně také dochází ke vzniku mikrotrhlin, vedoucích k vylamování částí břitů, či lomu v celém objemu nástroje.



Obr. 9 Opotřebení střížníku [14]

Podle opotřebení čela nástroje se určuje hloubka odbroušení materiálu, tak aby zůstala zachována geometrie nástroje. Obvyklým měřítkem opotřebení nástroje je výška ostřiny a určuje se podle ní vhodný čas pro přebroušení. Ekonomicky bývá účelné přebrousit nástroj již při prvních příznacích otupení, i když ostřina ještě není příliš velká. Nemusí se z nástroje na jedno ostření odbrousovat tolik materiálu, takže při odbroušení stejné celkové vrstvy se životnost nástroje znatelně prodlouží. Na obrázku 9 je pod číslem I zobrazena oblast opotřebení, číslo II a III vyjadřuje velikost opotřebení řezné hrany z čela a z boku, číslo IV pak vyjadřuje velikost opotřebení stíráním. Velikost opotřebení řezné hrany z boku (III) určuje hloubku odbroušení.

Otěruvzdornost je přímo úměrná tvrdosti. S jejím zvyšováním, se však zvyšuje i riziko křehkého lomu, který se projeví buď zlomením celého nože, nebo vylamováním ostří. Z tohoto důvodu je výhodné použít materiál se zvýšenou otěruvzdorností pro činné části nástroje a pro tělo nástroje použít materiál s dostatečnou tažností a houževnatostí. Tohoto konceptu lze docílit vložkami ze slinutých karbidů, úpravou povrchu nástroje nebo návary na sřizné hraně, které jsou zobrazeny na obrázku 10. Úpravy povrchu vedoucí ke zvýšení životnosti skýtají spousty možností.

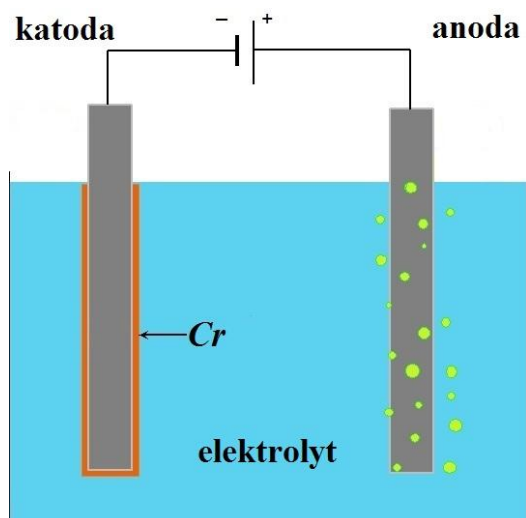


Obr.10 Navaření hrany sřizníku [16]

Jendou z nich je vytvoření na povrchu nástroje tenké vrstvy v řádech μm z jiného materiálu. Do této kategorie spadá tvrdé chromování. Modernější technologie vytváření tenkých vrstev jsou označovány jako povlakování a zahrnují chemickou depozici z plynné fáze (CVD metoda) nebo fyzikální depozici z plynné fáze (PVD metoda), která se dále dělí na naprašování, napařování a iontovou implantaci. Povlak ve formě tenké vrstvy má vyšší tvrdost i pevnost, než stejný homogenní materiál v jakékoli jiné formě. Tyto výhodné vlastnosti vyplývají zejména z toho, že povlakový materiál neobsahuje žádné pojivo, má o jeden i více řádů jemnější zrnitost, méně strukturních defektů a tvoří bariéru proti difuznímu mechanismu opotřebení nástroje.

Další možností je chemicko-tepelné zpracování, kdy se povrch součástí sytí vhodným prvkem (C, N, Bo, Cr) a to až do hloubky několika mm. Změnou chemického složení povrchové vrstvy lze docílit výhodné změny vlastností např. tvrdosti, odolnosti proti opotřebení a odolnosti vůči tepelnému zatížení. Chemicko-tepelného zpracování se dělí podle prvku, kterým se povrch sytí. Tato práce se zaměří jen na ty nejvýznamnější jako je cementace (sycení uhlíkem), nitridace (sycení dusíkem) a boridování (sycení bórem).

- **Tvrdé chromování** – je tvorba povlaku elektrolytickým vylučováním chromových sloučenin na povrch součástí. Při tomto procesu jsou do roztoku s vhodnými vlastnostmi, tzv. elektrolytu, zavedeny dvě elektrody, mezi nimiž protéká stejnosměrný proud o napětí 4 až 15 V. Průchod proudu zprostředkuje pohyb iontů mezi anodou (kladně nabitou



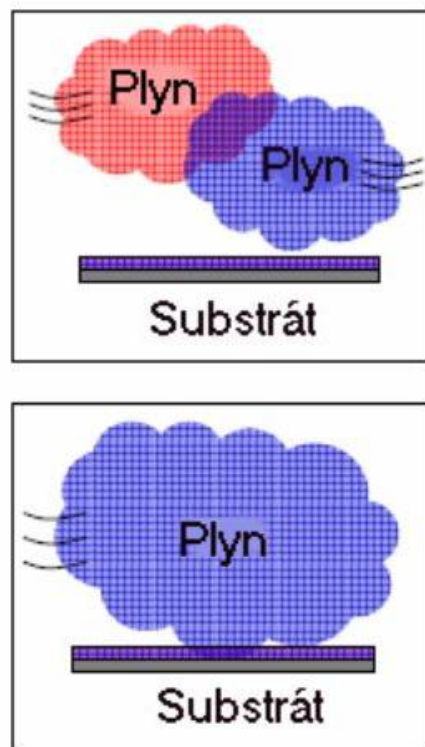
Obr. 11 Princip elektrolytického pokovování. [6]

elektrodou) a katodou (záporně nabitou elektrodou), kterou tvoří chromovaná součást. K vylučování chromu dochází vybíjením kovových iontů na katodě. Teplota procesu je průměrně $50 - 55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a tloušťka chromových povlaků bývá až 0,4 mm, kdy obvyklá rychlost růstu vrstvy je 0,03 mm za 1 hodinu. Tvrdost povrchové vrstvy dosahuje 800 HV. Tuto technologii lze použít i pro renovaci starých dílů, které už nesplňují rozměrovou, či tvarovou přesnost. Výhodou tvrdého chromování jsou nízké pořizovací náklady, vysoká povrchová tvrdost a odolnost proti opotřebení. Mezi nevýhody patří zbytková tahová pnutí ve vrstvě, snížení únavové pevnosti a hlavně vysoká ekologická zátěž procesu.

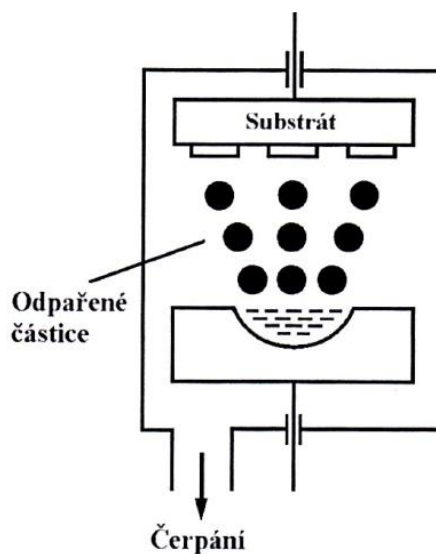
➤ Metoda CVD - je tvorba povlaku na bázi chemického napařování z plynné fáze. Zkratka CVD vychází z anglického označení Chemical Vapour Deposition. Jedná se o chemický proces, založený na reakci plynných chemických sloučenin v plazmě, která se tvoří v bezprostřední blízkosti povrchu podkladového materiálu, a následném uložení produktů heterogenní reakce na tomto povrchu, jak je schematicky zobrazeno na obrázku 12. Základním požadavkem je, aby výchozí plyny obsahovaly stabilní, ale přitom prchavou, sloučeninu (např. kovový halogenid, TiCl_4), která se chemicky rozkládá v důsledku přívodu energie (ohřevem, laserem, plazmovým obloukem). Aby proběhla požadovaná reakce, musí být v plynech obsažen i nekovový reaktivní plyn (např. N_2 , NH_4 , CH_4). Povlakování probíhá za vysokých tlaků (1 - 100 kPa). Vlivem přívodu energie chemická reakce probíhá při vysokých teplotách (700 – 1100 °C). Tuto teplotu však lze snížit změnou vstupní sloučeniny na 700 - 850 °C (metoda MTCVD) nebo použitím plazmicky aktivovaného CVD procesu na 400 - 600 °C. Snížení teploty umožňuje nástroje povlakovat až po konečném

zušlechťení na požadovanou tvrdost. Tato metoda v porovnání s ostatními způsoby vyniká skvělou adhezí povlaku k podkladovému materiálu, vysokou hustotou, homogenitou a teplotní stabilitou povlaku. Značnou nevýhodou je nemožnost napovlakovat ostré hrany, vysoká energetická náročnost a vznik tahových napětí vlivem rozdílných koeficientů tepelné roztažnosti. Tloušťka povlakované vrstvy cca 10 μm znemožňuje opakovatelnost, po otupení a následném odbroušení bude povlak nefunkční.

➤ Napařování – patří mezi PVD metody. Zkratka PVD vychází z anglického označení Physical Vapour Deposition čili fyzikálního napařování z plynné fáze. Při tomto procesu jsou deponované částice odpařovány z ohřívaných terčů, jak lze vidět na obrázku 13. Napařování probíhá ve vakuu, při tlaku 10^{-3} až 10^{-8} Pa. Při tomto tlaku je střední volná dráha v porovnání se vzdáleností terč - substrát velmi velká. Ke zmenšení střední volné dráhy, je nutno aby odpařené složky při pohybu k substrátu prodělaly vícenásobné srážky, čehož lze docílit přivedením odpovídajícího plynu (např. argonu) pod tlakem 0,7 až 26,7 Pa, což poté vede k vytvoření povlaku s rovnoměrnou tloušťkou. Metody odpařování lze dělit podle způsobu ohřevu terče na odpařování odporovými zdroji, elektronovým paprskem a nejčastěji používané odpařování



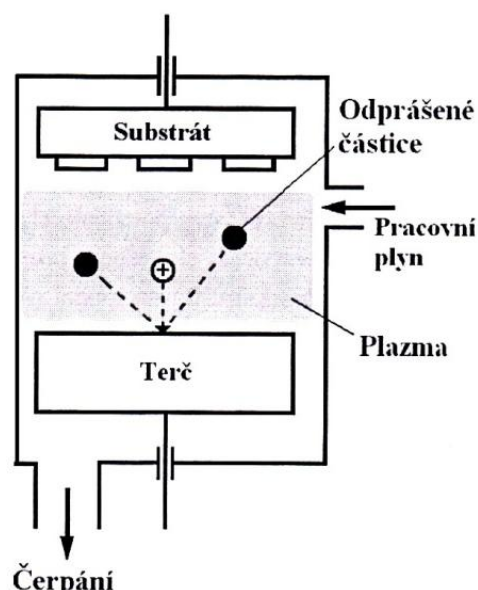
Obr.12 Princip CVD povlakování [11]



Obr. 13 Schéma napařování [15]

pomocí nízkonapěťového oblouku. Pomocí odpařování, lze vytvářet multivrstevné povlaky a nanokrystalické kompozity. Napařování je nejlevnější a jednou z nejsnazších PVD metod. Je zde však zapotřebí velké vakuové komory na udržení vzdálenosti mezi odpařovaným terčem a součástí a využití materiálu zdroje je velmi nízké.

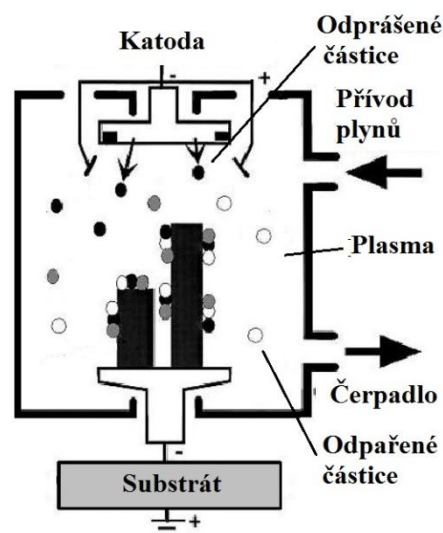
- **Naprašování – anglicky Sputtering.** Jde o depozici částic, kdy jsou prvky, které je třeba uvolnit pro nanesení povlaku, odprašeny z pevného stavu do plynného cíleným bombardováním zdrojového terče (tzv. targetu) atomy argonu nebo kryptonu, dle schématu na obrázku 14. Zdrojový terč je katoda vyrobená z materiálu, který má být naprašen. Ve vakuové komoře, s tlakem 0,1 – 1 Pa, která plní funkci anody, hoří ve velmi zředěném inertním plynu (argon, krypton) doutnavý výboj vytvořený elektrickým polem. Nad záporně nabitým terčem se výbojem udržuje plazma, jejíž kladné ionty jsou elektrickým polem urychleny na terč a při dopadu z jeho povrchu, v důsledku přenosu pohybové energie, vyrážejí (odprašují) jednotlivé atomy. Tento proces probíhá při teplotách kolem 350 °C. Takto uvolněné atomy jsou následně zionizovány a usměrněny na povrch povlakované součásti.



Obr. 14 Schéma naprašování [15]

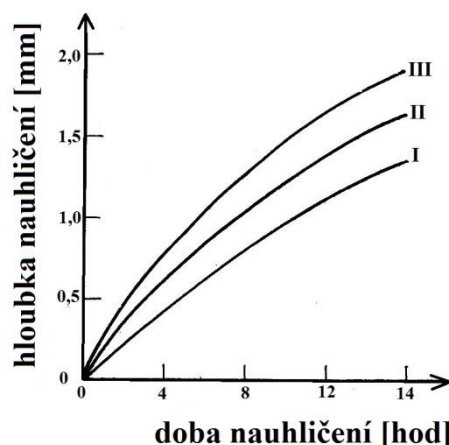
Oproti napařování je u naprašování nízké zatížení tepelnou radiací a terč a substrát tedy mohou být umístěny blízko sebe, což šetří místo vakuové nádoby. Nevýhodou je nutnost chlazení substrátu, většina energie dopadajících částí se totiž mění na teplo.

- **Iontová implantace –** je poslední významnou PVD metodu a jde o kombinaci odpařování a odprašování, kdy je povrch substrátu nebo deponovaný povlak bombardován svazkem částic s vysokou rychlostí. Zdrojem deponovaných částic může být odpařování, odprašování, plyny nebo páry, jak jde vidět na obrázku 15. Mezi substrátem (katoda) a terčem (anoda) je elektrické pole, kde dochází k elektrickému výboji v plynné atmosféře, který ionizuje částice plynu i odpařené částice. Reakcí iontů vzniká povlak, který se usazuje na povrchu substrátu. Tento proces probíhá ve vakuu při tlaku asi 1,3 Pa a povrch povlakovaný touto metodou se ohřívá pouze asi na 200°C. Všechny tři variace PVD metody umožňují napovlakovat ostré hrany a řídit genezi povlaku – chem. složení, zrnitost a krystalografii. Díky nižším teplotám nehrozí teplotní ovlivnění materiálu a v materiálu zůstávají minimální zbytková pnutí. Nevýhodou je směrovost procesu (je nutno s povlakovanými předměty pohybovat), nižší odolnost výsledného povlaku vůči abrazi a velmi tenká vrstva (1-5 μm).



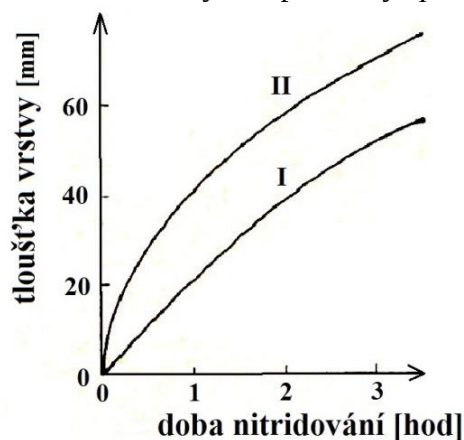
Obr. 15 Schéma iontové implantace [12]

- o Cementace – patří k nejstarším způsobem chemicko-tepelného zpracování. Dochází při ní k syčení povrchu oceli nebo litiny uhlíkem. Je to jeden z mála způsobů chemicko-tepelného zpracování, který lze provádět ve všech třech typech prostředí - pevném, plynném a kapalném. Nauhličení vede ke vzniku tvrdých karbidů na povrchu, ale také umožňuje zakalit povrch materiálu jinak chudého na uhlík. To vede k výraznému zvýšení tvrdosti a otěruvzdornosti povrchové vrstvy a současně zachování houževnatosti jádra. Cementace probíhá při teplotách nad A_{c3} , tedy v oblasti austenitu, který má větší rozpustnost uhlíku a proces syčení je tedy rychlejší. Teplota by však neměla překročit $950\text{ }^{\circ}\text{C}$, protože pak hrozí zhrubnutí zrna. Z cementační teploty se nástroje rovnou kalí do vody nebo do oleje a okamžitě se popouštějí na nízké teploty, kolem 200°C . Doba cementování přesahuje i několik desítek hodin a cementovaná vrstva bývá 1–2 mm silná. Na obrázku 16 je porovnání rychlosti nauhličování v pevném prostředí (křivka I), kapalném (křivka II) a plynném (křivka III). Nástroje s nauhličenou povrchovou vrstvou se mohou i několikrát přebušovat, aniž by bylo zapotřebí nauhličenou vrstvu obnovovat a přebušováním se trvanlivost řezných hran většinou ještě zvyšuje. U stříhadel pro trafoplechy se použitím úpravy povrchu nauhličováním trvanlivost zvýšila o 100%.^[1] Značnou nevýhodou je nutnost tepelného zpracování (kalení) až po cementaci, které zvyšuje riziko deformací součástí.



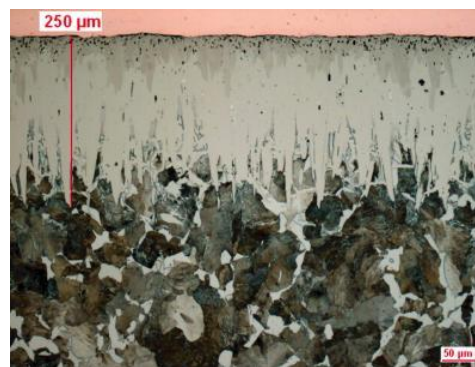
Obr. 16 Závislost hloubky nauhličení na čase [20]

- o Nitridace - syčení povrchu oceli nebo litin dusíkem. Lze provádět v plynném prostředí, termickou disociací čpavku, nebo v kapalném prostředí rozkladem kyanatanů v solných lázních. Nitridací vznikají v povrchové vrstvě velmi tvrdé nitridy slučováním dusíku s některými legujícími prvky např. chromem (CrN), molybdenem (MoN), vanadem (VN), wolframem (W_2N) apod.. V menší míře se dusík slučuje s uhlíkem a vytváří neméně tvrdé karbonitridy. Nitridy a karbonitridy se tvoří na povrchu materiálu a vytvářejí jednodlitou vrstvu, pod kterou vzniká přechodová oblast. Ta by měla být dvakrát větší, než je nitridovaná vrstva z důvodu stabilizace nitridované vrstvy. Nitridování má za následek zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy (na HV = 800 až 1200), otěruvzdornosti, odolnosti vůči únavovému namáhání a omezuje vliv vrubů na mez únavy. Teplota by při nitridování měla být o $10 - 20^{\circ}\text{C}$ nižší než je popouštěcí teplota nástroje, pohybuje se tedy v rozmezí $450 - 550\text{ }^{\circ}\text{C}$, což umožňuje zpracovávat nástroj až po tepelném zpracování bez rizika teplotního ovlivnění. Proces nitridace trvá několik desítek hodin a dosahuje se tloušťek nitridované vrstvy 0,2 – 0,6 mm, jak je patrné z obrázku 17, který ukazuje rychlost růstu vrstvy při teplotě $510\text{ }^{\circ}\text{C}$ (křivka I) a $560\text{ }^{\circ}\text{C}$ (křivka II). Tvrdost výsledné vrstvy je vyšší než u cementování, díky tepelnému zpracování před nitridací a minimálním deformacím, se nástroj po nitridaci už takřka neobrábí. Značnou nevýhodou je dlouhé trvání procesu, což lze do určité míry odstranit plasmovou nitridací.



Obr. 17 Závislost tloušťky vrstvy na čase [20]

- Boridování – nebo jinak bórování je sycení povrchu bórem a provádí se převážně v pevném prostředí. Pevným prostředím může být buď prášek, nebo pasta, a tímto pokrytý nástroj se podobně jako u cementace uzavře do žáruvzdorné skříně, kde se ohřívá. Boridovací teploty se pohybují mezi 800 – 900 °C, doba je závislá na materiálu nástroje a dosahuje se tloušťek 0,1 – 0,2 mm. Nástroje se po zpracování ještě zušlechťují. Boridované vrstvy vykazují vysokou odolnost vůči abrazivnímu otěru, vysokou tepelnou odolnost a malý sklon k naleptávání. Při nasazení v oblastech vysokých teplot převyšují boridované součástky nitridované nebo cementované díly.



Obr. 18 Mikrostruktura boridované vrstvy [27]

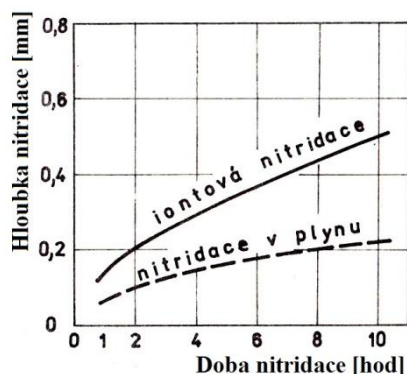
Tab.1 Základní parametry vybraných metod

	Teplota procesu	Délka procesu	Maximální tloušťka vrstvy	Tvrdost povrchu
Metoda	[°C]	[hod]	[μm]	[HV]
Tvrdé chromování	50 -55	15	0,004	800
CVD povlakování	700 - 1000	9	0,010	až 3 400
PVD povlakování	350	5	0,0025	až 3 200
Cementace	850 - 950	20	2	750 (po kalení)
Nitridace	450-550	až 50	0,6	1200
Boridování	800 - 900	16	0,2	1000

Z vybraných metod se jako optimální jeví plasmová nitridace. Nitridovaný nástroj vykazuje vysokou povrchovou tvrdost s plynulým přechodem do jádra materiálu. Tím je zvýšena otěruvzdornost a odpadá riziko odloupení povrchové vrstvy. V povrchové vrstvě vznikají tlaková pnutí, jež zamezují šíření únavových trhlin. Díky minimálním deformacím a změnám drsnosti povrchu nevyžaduje následné obrábění, což umožňuje nanitridovat stávající nástroje. Hloubka nitridované vrstvy v řádech desetin milimetru nabízí do jisté míry možnost přebroušení, tedy opakovatelnosti.

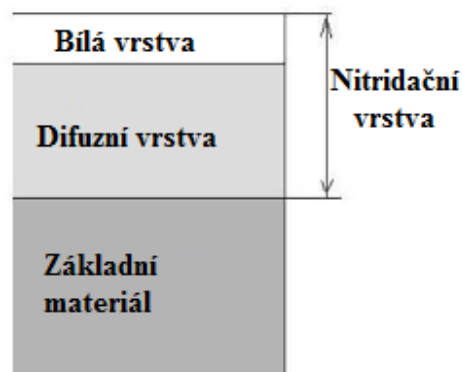
2 PLASMOVÁ NITRIDACE [5; 8; 10; 13; 15]

Plasmová, nebo jinak iontová, nitridace spadá pod technologii nitridování, čili sycení povrchu dusíkem. První výzkumy týkající se vzniku nitridů byly prováděny již na počátku



Obr. 19 Porovnání růstu vrstvy [8]

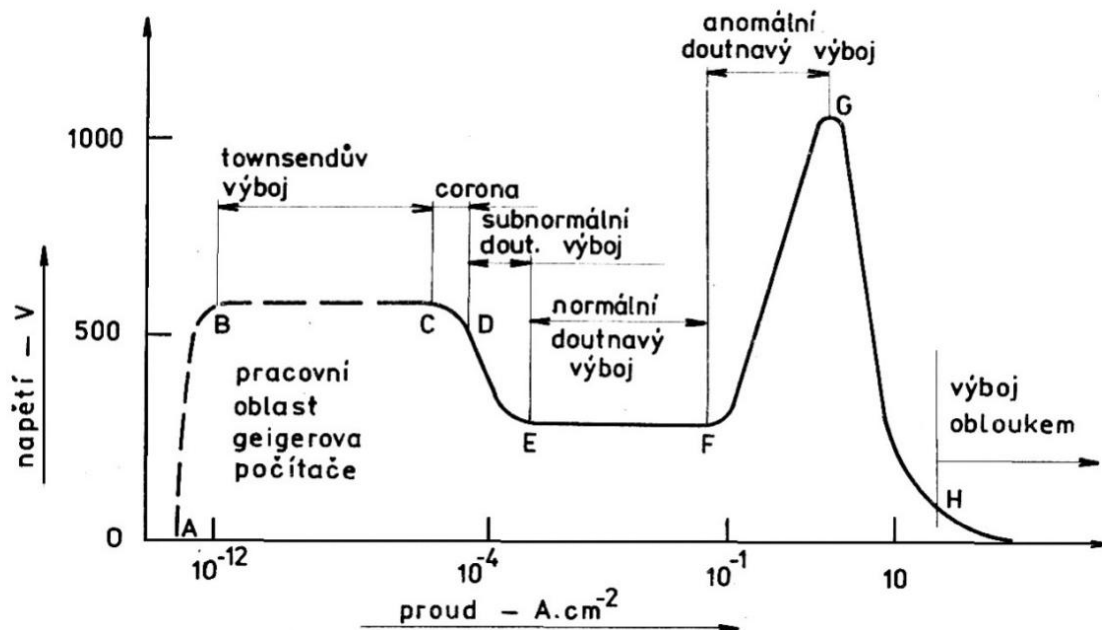
19.století. Následovaly první patenty a výzkum vlivu dusíku na výsledné vlastnosti materiálu. Ty poukázaly na zvýšení odolnosti vůči korozivním účinkům vody, příznivý vliv na odolnost proti opotřebení a vysokou odolnost vůči vlivu teploty. Dané vlastnosti, společně s minimálními deformacemi způsobenými procesem a vyšší tvrdost bez nutnosti povrchového kalení, zajistily nitridaci stálé místo v oboru povrchového tvrzení. Pro sycení dusíkem se využívala dvě prostředí; pevné a kapalné, obě však nesla nevýhodu v délce trvání procesu (až 50 hodin). Zmírnění této nevýhody a mnohých dalších přinesla plasmová nitridace. Údaje o rychlosti růstu vrstvy, se jak v odborné literatuře, tak v materiálech firem zabývajících se plasmovou nitridací, značně liší. To lze přisoudit různým podmínkám. I přes tyto nesoulady však lze jednoznačně říct, že je plasmová nitridace rychlejší než jiné nitridační procesy. Zřetelně je to vidět na obrázku 19, kde je porovnání rychlosti růstu nitridační vrstvy u konstrukční oceli. Mechanismus sycení povrchu je stejný jako u nitridace v plynné atmosféře, výrazně se však liší podmínkami. Základem je reakce na povrchu, která vytváří povrchovou vrstvu nitridů, tzv. bílou vrstvu nebo lem nitridů, která se dále rozpadá na nižší složky. Rozložení nitridovaných vrstev je na obrázku 20. Část dusíku vzniklého rozpadem nitridů z povrchu difunduje do mřížky a váže se na další atomy a tak vytváří difuzní podpovrchovou nitridační vrstvu. U sycení v plynu vzniká povrchová vrstva chemickou reakcí, disociací čpavku na vodík a dusík. Reakce se ovšem účastní jenom molekuly rozštěpené přímo na materiálu. Při využití plazmy povrchová vrstva vzniká odprašováním iontů železa a legujících prvků dopady urychlených iontů dusíku.



Obr. 20 Rozložení nitridovaných vrstev [8]

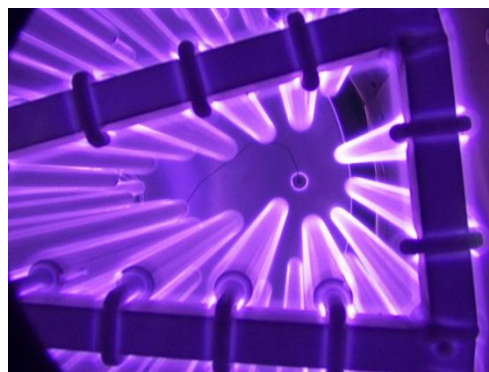
První výzkum nové metody za využití plazmy vedl německý fyzik Arthur Wehnelt v roce 1932. Díky možnosti řízení a rychlosti difuze dusíku do materiálu, si tento způsob velmi rychle získal pozornost. Na základě patentů dalšího německého fyzika dr. Berghause, který se věnoval studiu plazmy, byly ve čtyřicátých letech zkonstruovány první laboratorní zařízení, kterým se podařilo udržet silnoproudý doutnavý výboj v anomální oblasti. První průmyslová zařízení, která pracovala na principu stejnosměrného doutnavého výboje, se objevila o desetiletí později. Do tehdejšího Československa se zařízení pro nitridaci v doutnavém výboji dostalo koncem osmdesátých let. Původně zde byl používán název iontová nitridace, podle německého Ionennitrierung, později se vžilo označení plasmová nitridace. Vývoj stále pokračuje a nejmodernější zařízení jsou plně automatizovány s možností programování provozního cyklu. Řídící jednotka je schopna registrovat a regulovat hodnoty teploty, tlaku, napětí, proudu a složení plynu. Kromě technických zdokonalení pecí došlo i ke zdokonalení technologie samotné. Využití mikropulsního procesu, kdy se plasma střídavě zháší a zažihá a recipient je vyhříván, umožnilo dosáhnout lepší homogenity vrstvy.

Doutnavý výboj neboli plasma vzniká při snížení tlaku mezi dvěma elektrodami připojenými k dostatečně vysokému napětí. V takto vzniklém silném elektrostatickém poli jsou molekuly plynu rozštěpeny a zionizovány. Při ionizaci je z atomu uvolněn jeden nebo více elektronů tak, že vznikají kladně nabitě ionty - kationty, které jsou urychlovány ke katodě, a volné záporné elektrony, které se pohybují směrem k anodě. Další štěpení atomů je podporováno srážkami pohybujících se molekul a nosičů náboje. Takto zionizovaný plyn se stane vodivým a začne jím procházet proud, to se nazývá výbojem. Oblast anomálního doutnavého výboje lze pozorovat na obrázku 21.



Obr. 21 Závislost změny doutnavého výboje na napětí a plošné hustotě proudu [8]

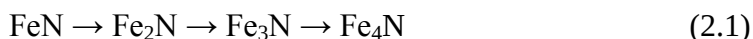
Pohyb kationtů a tím i jejich kinetická rychlost je zprvu takřka lineární, k prudkému nárůstu dochází v bezprostřední blízkosti katody, kde je největší úbytek napětí. Proto je největší intenzita dějů, jako je štěpení atomů a ionizace plynu, soustředěna do prostoru blízkého povrchu součásti a to nezávisle na jeho tvaru a vzdálenosti od anody. Výboj mající plošný charakter se ve zředěných plynech projevuje doutnavým světlem, kopírujícím povrch součásti, které dalo tomuto výboji název. Světlo doutnavého výboje (obr 22) bylo využíváno v osvětlovací technice, na to byl používán normální výboj s malou hustotou proudu a nízkým napětím. Pro nitridaci se využívá tzv. anomálního výboje, který se objevuje při vysoké proudové hustotě a napětí 250 – 1000 V, ten je nestabilní a má tendenci přejít do výboje obloukem, čemuž je nutno zamezit.



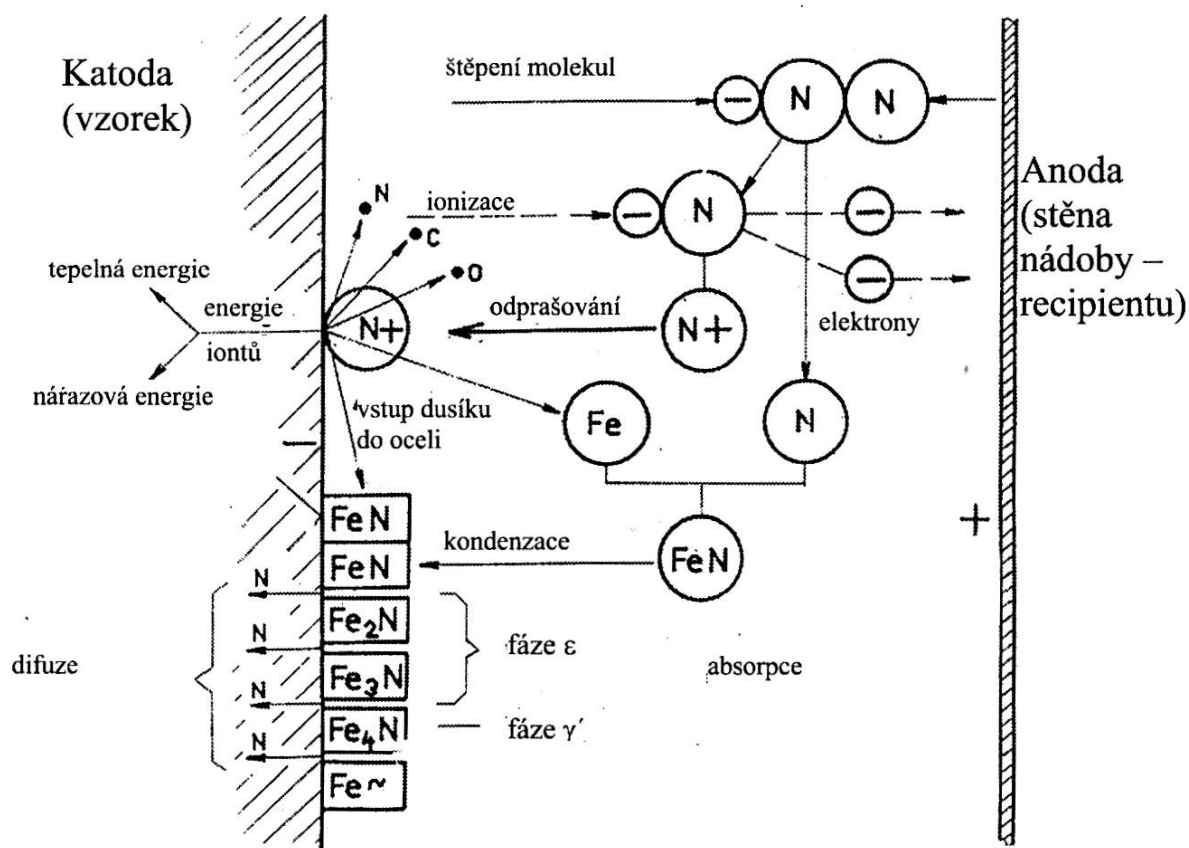
Obr. 22 Světelný projev doutnavého výboje [13]

V podmínkách plasmové nitridace tvoří kladnou elektrodu (anodu), vsázka a zápornou elektrodu (katodu) recipient. Recipient je nerezová vakuová nádoba udržující snížený tlak, ve které jsou součásti uloženy. Do recipientu je přiváděna zředěná směs nitridačního plynu. Jak již bylo řečeno i k plasmové nitridaci je nutný atomární dusík, proto směs většinou tvoří kombinace dusíku N_2 a vodíku H_2 . Někteří považují přítomnost vodíku ve směsi za rozhodující, provedené pokusy však tuhle teorii nepotvrdily. Působením elektrostatického pole jsou tyto molekuly rozštěpeny a kladné ionty N^+ jsou urychlovány na povrch součásti

a dopadají s vysokou kinetickou energií. Část této energie se spotřebuje na vyražení atomů železa a legur z povrchu a zbylá energie se mění na tepelnou a zajišťuje ohřev součásti. Vyražení atomů na povrchu se nazývá odprašování nebo katodové odprašování a bylo zmíněno již u jedné z PVD metod (naprašování). Při povlakování jsou využity odprašené atomy, které se usazují na povlakovaném povrchu. Zde se odprašené ionty a atomy slučují s atomárním dusíkem přítomným v plasmě a vytvářejí nitridy, které kondenzují na povrchu. Takto vzniká vrstva s vysokým obsahem dusíku (až 30 %) obsahující převážně nitridy. Přesycené nestabilní nitridy z povrchu se dále rozpadají dle rovnice:



Z tohoto rozpadu uvolněný dusík dále difunduje do materiálu, kde se váže s atomy železa a legujících prvků a vytváří nitridovanou vrstvu viz obrázek 23. Přímý vstup iontů dusíku do materiálu má na sycení jen velmi malý vliv, nejvíce dusíku se do oceli dostane rozpadem povrchové vrstvičky a následnou difuzí. Odprašování má za následek i dokonalé očištění vyrážení oxidů z povrchu, čímž se především u vysoce legovaných ocelí, zlepšují podmínky pro nitridaci. Naopak odprašení uhlíku potlačuje karbonitridickou mřížku na hranicích zrn.



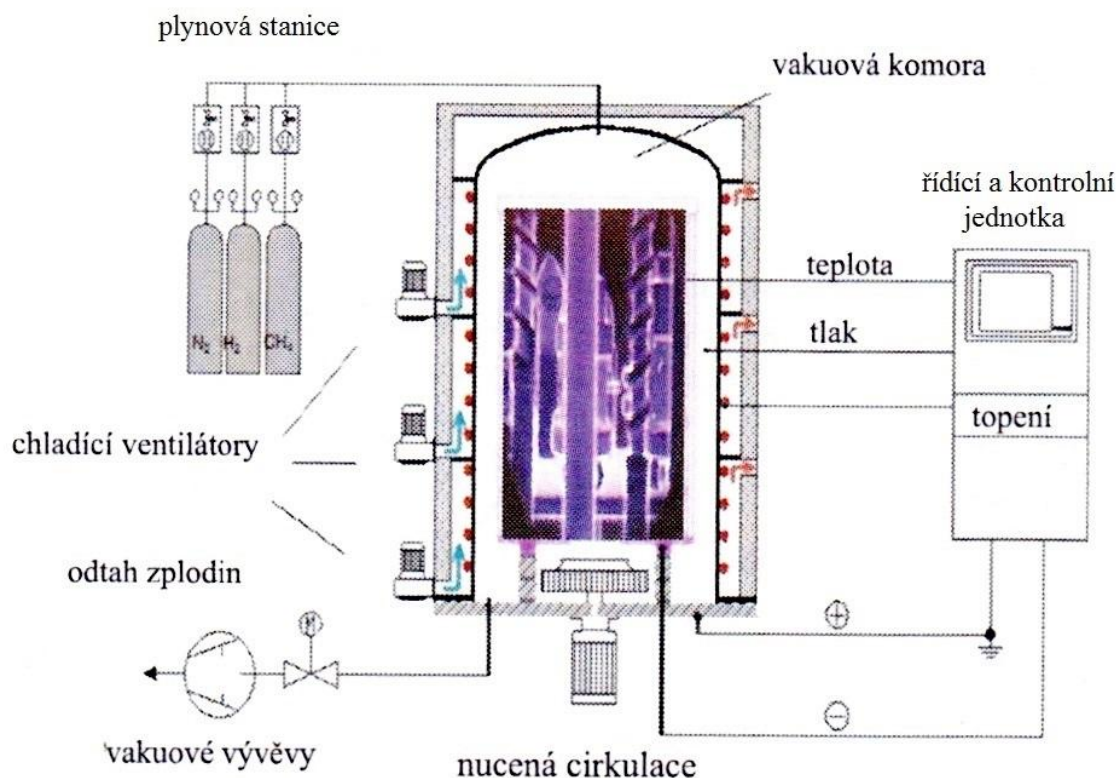
Obr. 23 Schéma dílčích procesů při plasmové nitridaci [15]

Na základě znalosti vlastností materiálu a plazmatu a efektivní změnou pracovního prostředí, lze pružně měnit jak hloubku nitridované vrstvy či samotnou tvrdost, tak i tloušťku bílé vrstvy, nazývanou též lem nitridů. Základní parametry jsou teplota, čas, napětí a složení reaktivní atmosféry. Nejdůležitějším z nich je teplota, ta ovlivňuje rychlost tvorby vrstvy a její tvrdost. Je dána intenzitou výboje, která je závislá na napětí a proudové hustotě, její regulace probíhá pomocí chlazení nebo v případě mikropulsní metody přehříváním. Nutnost přehřívání zde vyplývá z nedostatku energie vlivem existence pulsních mezer v procesu, ale přináší výhodu v homogenizaci teplotního pole. Díky plošnému charakteru výboje probíhá ohřev součásti teoreticky rovnoměrně. V praxi je ale nutno dbát zvýšenou pozornost na sestavení

vsázky, protože při nevhodném rozmístění součástí, mohou být některé části "odstíněné" a snížená hustota dopadajících iontů způsobí snížení teploty. Podobný problém může nastat u nitridování dlouhých a štíhlých otvorů.

2.1 Iontonitridační zařízení

Jednotlivá zařízení, která jsou na trhu dostupná, se často liší konstrukčním řešením v závislosti na účelu, technické úrovni a tradici výrobce. Základní části nutné k dosažení všech podmínek nutných k nitridaci se ale nemění a budou demonstrovány na obrázku 24, který zobrazuje zařízení pro mikropulzní nitridaci. Od klasických iontonitridačních jednotek se liší přidáním vytápěcí jednotky a generátorem pulzní plasmy.



Obr. 24 Schéma zařízení pro mikropulzní plasmovou nitridaci [15]

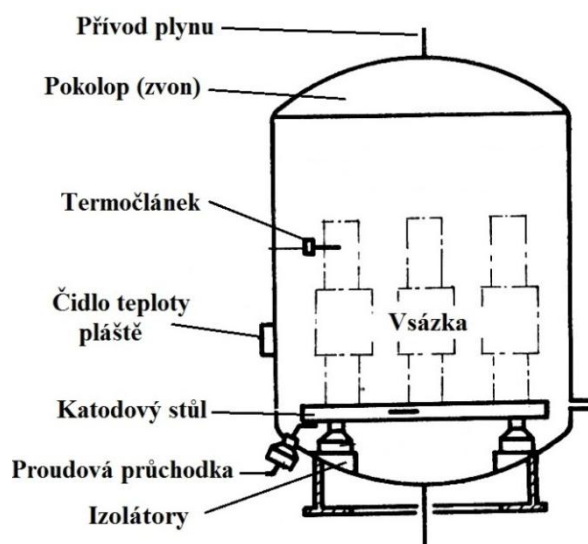
- Vakuová nádoba (recipient) – je hlavní částí iontonitridační jednotky a jeho vnitřní stěna tvoří zápornou elektrodu, nutnou ke vzniku elektrického pole. Napětí je přiváděno na katodový stůl, který je umístěný na izolátorech ve spodní části nádoby. Recipient udržuje snížený tlak provozních plynů, proto musí být dobře utěsněn. Je k němu připojena elektrická jednotka napájející obvod stejnosměrným proudem o napětí 250 – 1 000 V, které je schopno zapálit a udržovat doutnavý výboj. Její součástí je transformátor, usměrňovač, zařízení pro plošnou stabilizaci výboje a regulace proudu a napětí.
- Vakuové vývěvy – jsou připojeny k recipientu a před začátkem procesu z něj odsávají vzduch tak aby bylo dosaženo podtlaku 5 – 10 Pa, tím jsou odstraněny stopy po předchozí atmosféře a zbylé zplodiny, které by mohly ovlivnit následující proces. Po zahájení nitridace kdy je do recipientu přiváděna nová směs plynů, udržují předepsaný tlak. Ten se běžně pohybuje v intervalu 100 – 800 Pa, což odpovídá oblasti hrubého vakua, na jehož udržení je plně dostačující běžná jednostupňová rotační vývěva.
- Chladičí ventilátory a topení – regulují teplotu uvnitř a na povrchu recipientu. Většina tepla vzniká přeměnou dopadové energie iontů. Při použití pulzní technologie se část této energie ubírá vlivem pulzních mezer, proto je nutno ji dodat vnějším vytápěním.

Chladicí ventilátory tepelnou energii odebírají a zajišťují, aby nedošlo k přehřátí stěny na teplotu vyšší než je 80 °C a pomáhají při ochlazování součástí po ukončení procesu.

- Plynová stanice – slouží k přípravě nitridační atmosféry a je schopna zásobovat více než jednu nitridovací stanici. Jsou zde uloženy tlakové láhve, redukční ventily a zařízení pro směšování a úpravu tlaku. Při nízké spotřebě, se směs připravuje z čistých plynů, při vyšší lze použít zařízení pro štěpení čpavku nebo využít připravených směsí v tlakových lahvích.
- Řídící a kontrolní jednotka – zabezpečuje plynulý chod procesu. Jsou zde vyústěna všechna čidla a snímače, které zabezpečují ochranu zařízení i nitridované součásti v případě překročení teploty, poruchy, přerušení dodávky plynu nebo chladicí vody. Vše je spojeno elektronickými obvody a řízeno sofistikovaným softwarem, tudíž je po dosažení nitridační teploty a seřízení parametrů možný bezobslužný provoz. V případě poruchy dojde k automatickému vypnutí zařízení.
- Kontrolní čidla – snímají podtlak v recipientu, uzemnění poklopu, teplotu stěn atd. Pro snímání teploty v prostoru recipientu a na nitridovaných součástech jsou většinou použity termočlánky, méně pak odporová čidla z důvodu pomalejší odezvy. V průběhu procesu také dochází k bezdotykovým operativním zjišťováním teploty. K tomu jsou nejčastěji používány optické pyrometry, které k měření teploty využívají tepelné záření.

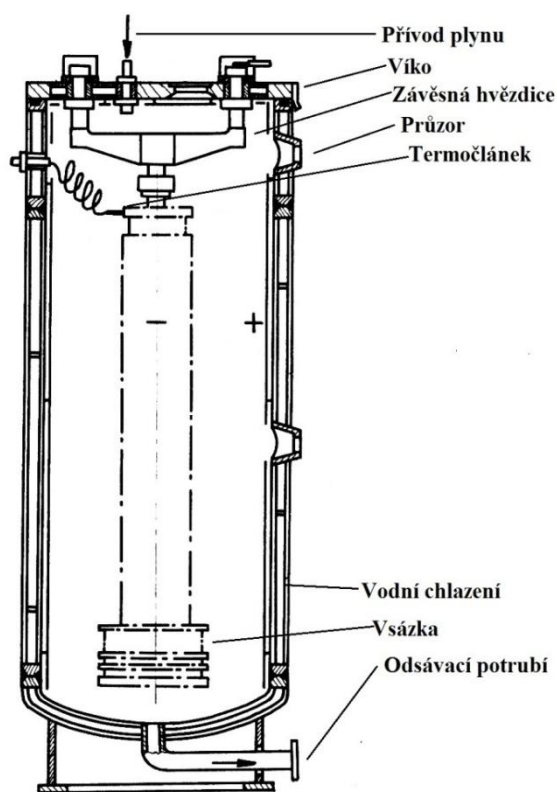
Recipienty jsou přizpůsobeny tvarům a rozměrům zpracovávaných součástí. Existují tři základní typy zvonové, šachtové a kombinované.

- Zvonové nádoby jsou typické rovnocenností poměru výška ku šířce. Spodní díl tvoří dvojité dno a vertikální stěna, na kterou se volně pokládá poklop (zvon). Jeho zvedání a přenášení zajišťuje buď jeřáb, nebo je zařízení vybaveno odklápěcím mechanismem. Chlazení se realizuje průtokem kapaliny dvojitou stěnou nebo navařenou spirálou. Utěsnění poklopu zajišťuje přesně opracovaná styková rovina a těsnění uložené v drážce. Ve spodním dílu nádoby je na izolátorech uložen katodový stůl, který tvoří plech z oceli běžné jakosti. Počet izolátorů, nejčastěji 3 nebo 6, je dán velikostí a zatížením stolu, přičemž jeden izolátor unese až 2 tuny. Stůl je přes izolační průchodku zapojen do elektrické jednotky. Další izolační průchodky slouží k připojení termočlánku, přívodu směsi a odsávání vývěvami. Vzhledem k vysokým nárokům na těsnící a izolační vlastnosti, to jsou jedny z nejvíce namáhaných částí a jejich životnost by měla být při trvalém provozu nejméně 10 měsíců. Na zvonu a stěně recipientu jsou umístěny průzory, které umožňují sledování výboje a bezdotykové měření teploty. Zpracovávané součásti se běžně pokládají na stůl a to samostatně nebo do stohů. Dlouhé štíhlé součásti se zavěšují. Díky jednoduchému ukládání na stůl se snižuje počet přípravků a tím, úměrně s jejich plochou, i spotřeba elektrické energie. Ideálního rozložení vsázky je možno dosáhnout vhodným umístěním za použití jednoduchých podložek. Zkušená obsluha je vhodným rozmístěním schopna nitridovat současně součásti, jež mají předepsanou rozdílnou teplotou.



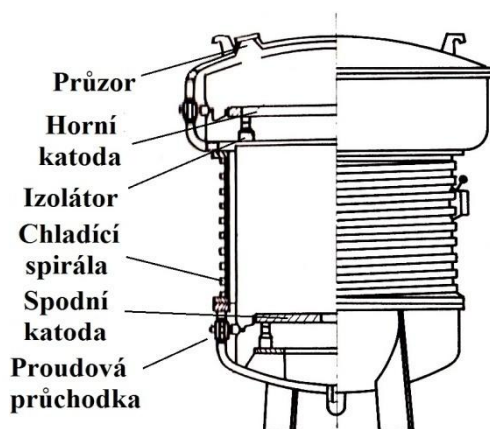
Obr. 25 Schéma zvonové nitridační nádoby [8]

- Šachtové recipienty jsou výrazně vyšší než širší a slouží především k nitridování dlouhých štíhlých součástí. Dno je pevně připevněno k válcovitému plášti a celá spodní část bývá zapuštěna v zemi. Chlazení je zde stejně jako u zvonové nádoby možné dvouplášťovým provedením stěny nebo chladicí spirálou, zde je však rozděleno na jednotlivé segmenty tak aby byla zajištěna rovnoměrná teplota v celé délce. Plášť může být jednolitý nebo modulový, tj. seskládaný z více kratších kusů utěsněných v dělicích rovinách a je stejně jako ve zvonovém provedení opatřen průzory. Nitridované součásti se zavěšují buď na víko, nebo na opěrný okruh umístěný v recipientu. V prvním případě musí mít víko dostatečnou tuhost s ohledem na hmotnost největší povolené vsázky, tak aby nedošlo k sebemenší deformaci vedoucí k netěsnosti. Izolační průchodky proudy jsou umístěny ve víku a navrženy tak aby mohly být namáhány tahem, jejich rovnoměrné zatížení je zajištěno tuhým závěsným kruhem nebo hvězdici. Přívod proudu, chladicí vody a připojení termočlánků, musí být odpojitelné a s víkem je možno manipulovat pouze jeřábem. V druhém případě jsou součásti zavěšeny na pomocný příčník nebo hvězdici, která je následně položena na mezikruží uložené na izolátorech v rozšířené horní části recipientu. Takové provedení je výhodnější zejména kvůli snížení rizika netěsnosti. Víko je lehčí a snáze se s ním manipuluje, může v něm být umístěn průzor a proudová průchodka není mechanicky namáhána. Šachtovitý tvar se nejčastěji používá k nitridování součástí delších než 2 000 mm, můžou zde ale být umístěny i kratší součásti zavěšeny pod sebe. Na obrázku 26 je šachtový recipient s chlazením skrze dvouplášťovou stěnu a se zavěšováním na víko pomocí hvězdice.



Obr. 26 Šachtová nitridační nádoba [8]

- Kombinované provedení slučuje oba předchozí tvary, šířkově je podobné zvonovým nádobám a dosahuje asi poloviny výšky šachtových. Je zde možno nitridovat dlouhé součásti zavěšené na katodový kruh (horní katoda) nebo robustnější a těžší součásti postavené na katodový stůl (spodní katoda). Při pokládání na stůl je možno sejmut plášť i s víkem, při zavěšování stačí sejmut víko. Přívod proudu je přepínatelný mezi oběma variantami, proto nelze nitridovat současně postavené a zavěšené součásti. Na obrázku 27 je schématicky zobrazena kombinovaná nádoba, lze na něm vidět chlazení realizované navařenou spirálou.



Obr. 27 Kombinovaný recipient [8]

Na proces nitridace v doutnavém výboji má významný vliv nitridační atmosféra. Zatímco pro nitridaci v plynném prostředí se využívá pouze čpavku, zde je možností víc. Čpavek NH_3 se využívá také, ale málokdy se dává přímo do nitridační nádoby. Nejčastěji se čpavek štěpí ve speciálním zařízení podle rovnice 2.2.



Takto vzniklá směs čistých plynů N_2 a H_2 je velmi levná a protože je plně dostačující pro většinu konstrukční ocelí s běžnými požadavky, tak je taky nejčastěji využívána. Dále se využívá methanu CH_4 a argonu Ar a to vždy ve směsi s vodíkem, nebo vodíkem a dusíkem. Jednotlivé směsi lze namíchat z čistých plynů do tlakové láhve, vpouštět do recipientu přes průtokoměry nebo přes speciální směšovací zařízení.

Nitridační atmosféra má jako takřka jediná vliv na tvorbu bílé vrstvy. O fázovém složení bílé vrstvy rozhoduje koncentrace dusíku v atmosféře. Bílá vrstva může být složena ze samotné fáze γ' , ϵ , jejich kombinace, nebo ji můžeme potlačit úplně.

- γ' fáze je nitrid Fe_4N . Atomy železa v tomto nitridu tvoří kubickou, plošně centrovanou mřížku a atomy dusíku v ní zaujímají oktaedrické intersticiální polohy.
- ϵ fáze se vyznačuje širokým rozmezím složení – Fe_2N až Fe_3N . Atomy železa v něm tvoří uzlové body hexagonální mřížky a dusík zaujímá intersticiální polohy mřížky.

K vytvoření čistě difuzní vrstvy bez lemu nitridů je procento dusíku minimální. Mírně vyšší je pro vytvoření bílé vrstvy z fáze γ' a pro kombinaci obou fází je poměr plynů stejný. Pro vytvoření nitridů ϵ je nutno přidat do atmosféry methan CH_4 .

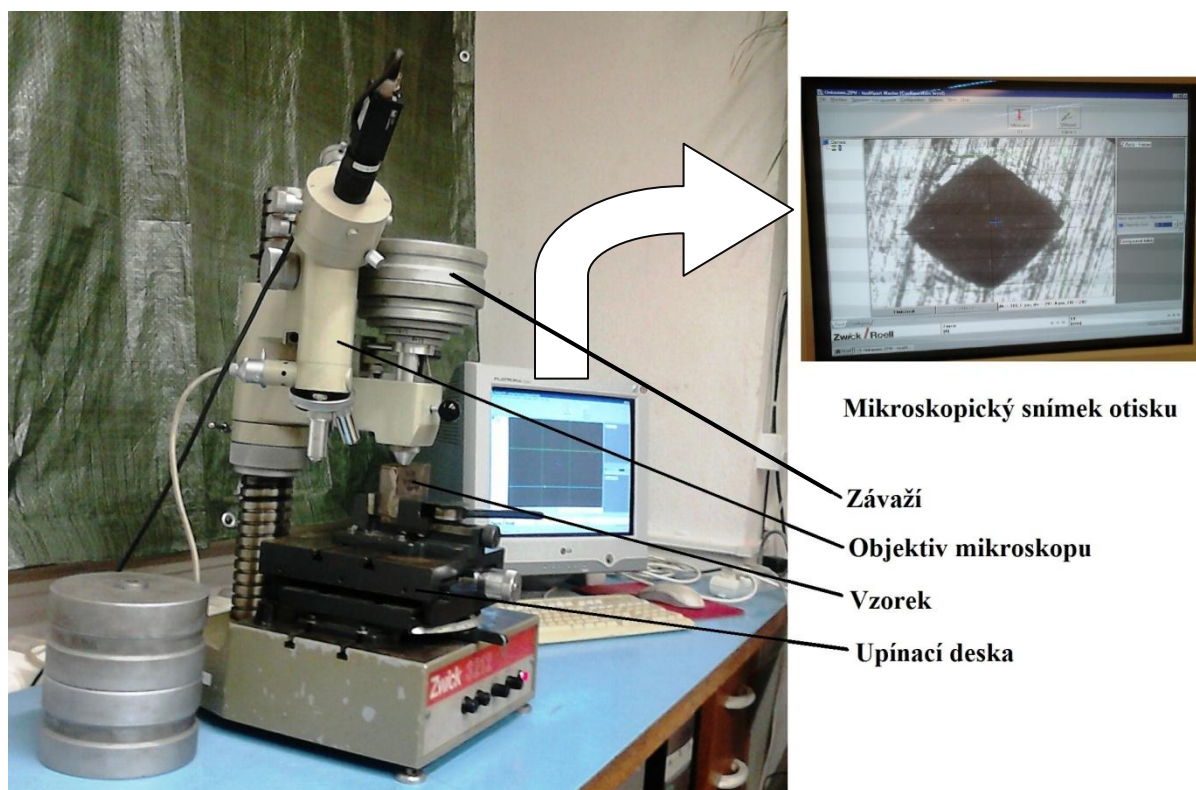
Dalším významným faktorem je teplota nitridace. Plasmová nitridace poskytuje velmi široké pásmo teplot od 350 do 600 °C. Všeobecně jsou výhodnější nižší teploty. Jejich použití snižuje riziko popuštění materiálu a změny struktury, takže zůstane zachována pevnost jádra. Při použití nižších teplot jsou menší deformace a rozměrové změny a dosahujeme vyšší povrchové tvrdosti. Rychlost růstu vrstvy je ale nižší, proto je nutno nitridovat delší dobu.

Nitridace za vyšších teplot se využívá hlavně ke zvýšení korozivzdornosti. Doba zpracování musí být úměrně krátká, aby nedošlo ke změně rozměrů, drsnosti povrchu nebo ke zhrubnutí zrna.

3 EXPERIMENT [8]

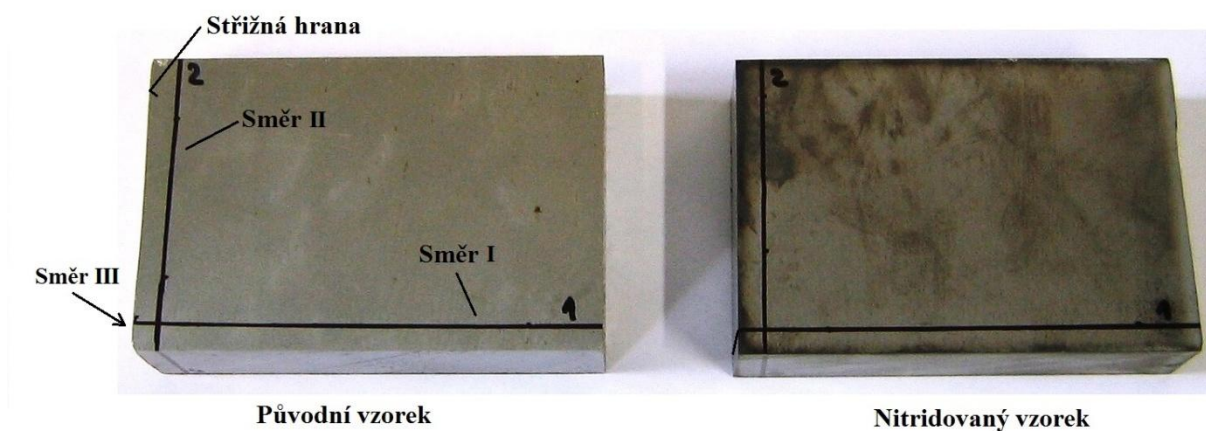
Pro posouzení trvanlivosti nitridovaného nástroje jako takové, by bylo nutno jeho použití v provozu a následné sečtení konečného počtu výstrižků. Takový experiment je však časově velice náročný, proto byla zkoumání podrobena pouze tvrdost, která má na životnost přímý vliv. Zvýšení tvrdosti povrchu zlepšuje odolnost vůči abrazi, aniž by se zvyšovalo riziko křehkého lomu. Tvrdost společně s hloubkou nitridované vrstvy je pak také jediným kontrolovatelným ukazatelem správného výsledku iontové nitridace. Měření byly podrobeny dva vzorky oddělené ze střižného nože z oceli 19 733. První vzorek byl ponechán bez úpravy a druhý byl plasmově nitridován při teplotě 450 °C po dobu 15 hodin. Po nitridaci byla na druhém vzorku ofrézována plocha kolmá na čelo nástroje, pro změření průběhu tvrdosti do objemu materiálu. Dále byl proveden metalografický výbrus pro posouzení mikrostruktury obou vzorků a vyhodnocení tloušťky vrstvy.

Tvrdost byla měřena metodou podle Vickerse na tvrdoměru Zwick 3212. Zkouška tvrdosti podle Vickerse spočívá ve vtlačování čtyřbokého jehlanu s vrcholovým úhlem 136 ° do zkoumaného materiálu, zatěžující síla bývá 10 - 300 N a doba zatížení 10 - 15 sekund. Zatěžující síla je dána hmotností závaží umístěném na tvrdoměru a volí se v závislosti na charakteru zkoumaného materiálu. Při měření tvrdosti povrchových vrstev a povlaků je nutno aby hloubka vtisku nepřesáhl 1/10 jejich tloušťky. Proto bylo použito závaží o hmotnost 10 kg vyvolávající zátěžnou sílu 98,1 N, měření s takovouto zátěžnou silou je označováno HV 10. Doba zatěžování v tomto případě 13 s, se počítá od dosednutí hrotu na povrch součásti. U této metody se tvrdost vyhodnocuje pomocí délek úhlopříček vtisku. K tomu byl použit mikroskop, umístěný na tvrdoměru, připojený k počítači a program testXpert. Tento program zobrazuje mikroskopické snímky v reálném čase a umožňuje odečíst rozměry vtisku pomocí souřadnicového kříže. Z odečtených hodnot software přepočítá hodnoty tvrdosti, které byly dále převedeny na tvrdost podle Rocwella – HRC. Měřící stanoviště je na obrázku 28.



Obr. 28 Měřící stanoviště

Rozměr vzorků byl 56x85x16 mm a tvrdost byla měřena ve třech směrech. Směr III byl veden po čele nástroje pro určení tvrdosti povrchu. Směr II jdoucí souběžně se střížnou hranou posloužil pouze ke korekci případné nehomogenity materiálu. Směr I ukazuje průběh tvrdosti do objemu materiálu.



Obr. 29 Vzorky použité pro měření tvrdosti

Tvrdost naměřená na původním vzorku je v tabulce 1 tvrdost nitridovaného vzorku v tabulce 2. Největší výpovědní hodnotu má měření ve směru I, tedy průběh tvrdosti do objemu materiálu.

Tab.2 Hodnoty tvrdosti naměřené na původním vzorku

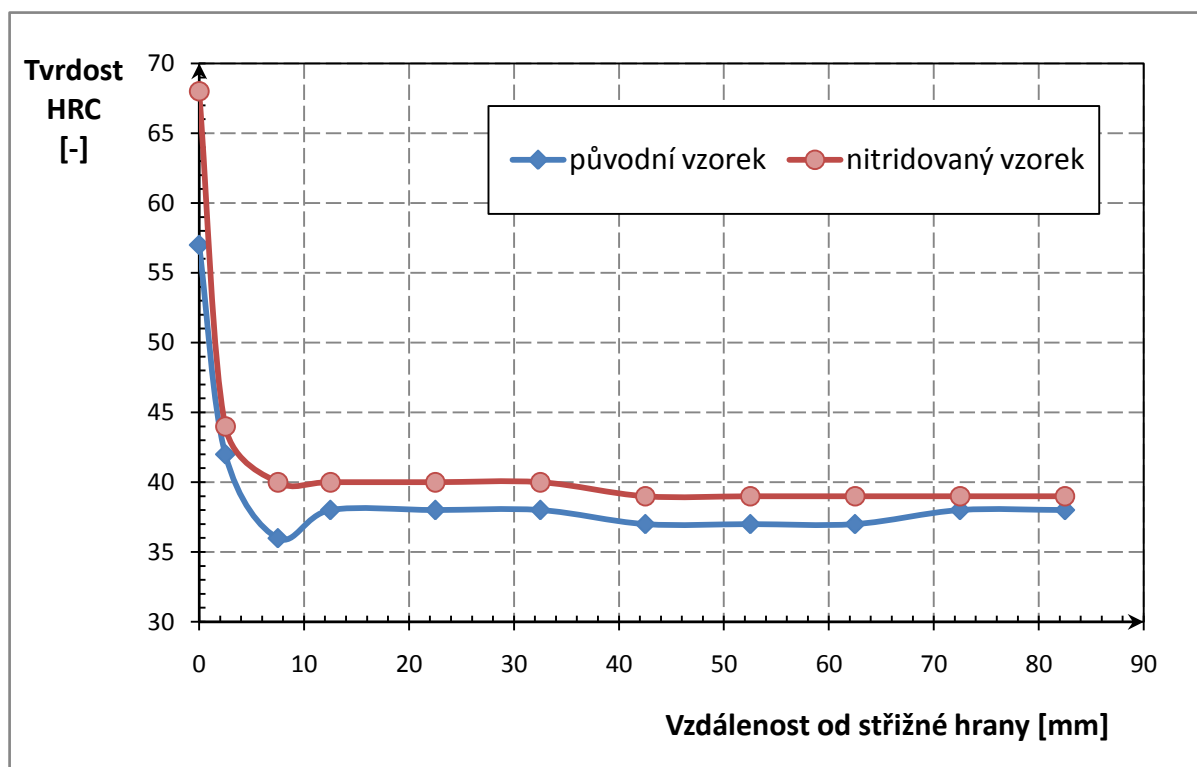
Vzdálenost I	Tvrdost HV	Tvrdost HRC	Vzdálenost II	Tvrdost HV	Vzdálenost III	Tvrdost HV
[mm]	-	-	[mm]	-	[mm]	-
0	759	57	5	360	1	733
2,5	415	42	10	353	3	773
7,5	353	36	15	358	5	726
12,5	369	38	20	360	7	766
22,5	366	38	25	351	9	789
32,5	371	38	30	354	11	785
42,5	361	37	35	348	13	759
52,5	359	37	40	357	15	739
62,5	364	37	45	357	Průměr:	759
72,5	368	38	50	354		
82,5	373	38				

Tab.3 Hodnoty tvrdosti naměřené na povlakovaném vzorku

Vzdálenost I	Tvrdost HV	Tvrdost HRC	Vzdálenost II	Tvrdost HV	Vzdálenost III	Tvrdost HV
[mm]	-	-	[mm]	-	[mm]	-
0	967	68	5	971	1	993
2,5	431	44	10	957	3	978
7,5	391	40	15	947	5	1062
12,5	395	40	20	952	7	1078
22,5	390	40	25	909	9	957
32,5	392	40	30	875	11	854
42,5	383	39	35	875	13	897
52,5	382	39	40	866	15	920
62,5	384	39	45	976	Průměr	967
72,5	381	39	50	976		
82,5	384	39				

Průměr z hodnot naměřených ve směru III byl použit jako povrchová tvrdost, tvrdost ve vzdálenosti 0, pro směr I. Měření ve směru II na původním vzorku ukazuje, že se hodnoty tvrdosti podél hrany pohybují v rozmezí 348 – 360 HV a materiál lze tedy považovat za velmi homogenní. Případné odchylky všech měření nemusí být nutně způsobeny rozdílnou tvrdostí materiálu, ale nekvalitou povrchu, která ztěžuje odečítání rozměrů úhlopříček vtisku.

Hodnoty naměřené ve směru I na obou vzorcích ukazují, že i před nitridací byla tvrdost povrchu vyšší než tvrdost jádra. Po nitridaci se tvrdost povrchu zvýšila z 57 HRC na 68 HRC, zatímco tvrdost jádra se změnila z 37 na 39. Lze tedy předpokládat, že zůstala zachována i houževnatost jádra. K největšímu nárůstu tvrdosti dochází v 0,2 mm široké vrstvě těsně pod povrchem materiálu. Původní tvrdost povrchu, 57 HRC, plně koresponduje s tvrdostí očekávatelnou po tepelném zpracování - popouštění na 56 HRC. Tvrdost povrchu po nitridování 68 HRC, tedy 967 HV, je vyšší, než bylo očekáváno. Běžně se iontovou nitridací zvyšuje tvrdost povrchu na 58 – 64 HRC. Na takový výsledek měla vliv nižší teplota (450 °C) nebo chrom a wolfram obsažený v materiálu. Oba prvky vytváří velmi tvrdé karbidy, i když chrom působí negativně na hloubku nitridace.



Obr. 30 Výsledky měření tvrdosti

Dalším zkoumaným parametrem byla mikrostruktura oceli před a po nitridaci a tloušťka nitridované vrstvy. Při nitridaci za nízkých teplot lze očekávat, že jemnozrnná struktura původního materiálu zůstane zachována. Metalografický výbrus byl proveden ve směru kolmém na nitridovaný povrch. V případě velmi tenkých vrstev je možno aplikovat šikmý metalografický výbrus, kdy se jedna strana vzorku podloží podpěrou a výbrus je veden rovnoběžně s podložkou. Takto je možno zvětšit tloušťku až pětinašobně, což umožňuje lepší zkoumání struktury nebo průběhu mikrotvrdosti. V tomto případě kdy je předpokládaná tloušťka vrstvy 0,1 mm je však kolmý výbrus plně dostačující. Na obrázku 31 je výbrus při zvětšení 200x na obrázku 32 je výbrus zvětšen 400x.



a) původní nůž

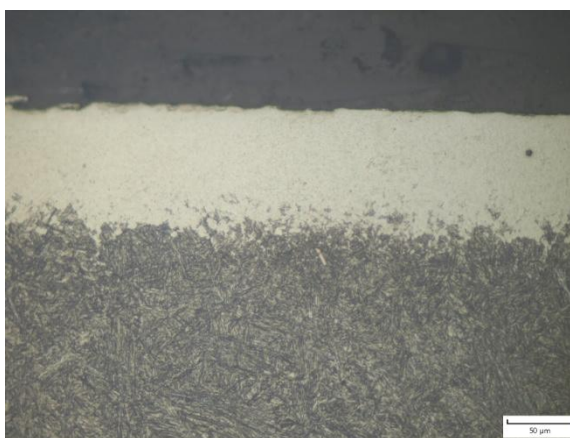


b) nůž s nitridovanou vrstvou

Obr. 32 Metalografická analýza (zvětšení 200x)



a) původní nůž



b) nůž s nitridovanou vrstvou

Obr. 32 Metalografická analýza (zvětšení 400x)

Z fotografií metalografického výbrusu je patrné, že struktura materiálu opravdu zůstala zachována. Difuzní vrstva má tloušťku cca 0,1 a na fotografii má bílou barvu. Povrchová vrstva bohatých nitridů ze kterých se nitridy rozpadají a dále difundují do materiálu, označovaná jako lem nitridů nebo bílá vrstva, není na výbrusu zřetelná. Buď je vlivem nižší teploty tenčí než je hranice rozpoznatelnosti, nebo byla volbou atmosféry potlačena úplně.

Druhý materiál použitý ve společnosti Siemens, ocel 19 436, experimentálně prověřován nebyl, ale literatura tvrdí, že při nitridování po 24 hodin při teplotě 560 °C mírně klesá pevnost, ale povrchová tvrdost je až 68 HRC a hloubky 0,2 – 0,3 mm. Takto upravený nástroj vykázal při plošném tváření až trojnásobnou životnost oproti nenitridovaným a kaleným nástrojům. ^[8]

4 ZÁVĚRY

Nejvhodnějším způsobem zvýšení životnosti střižného nástroje je modifikace jeho povrchu a to buď povlakováním nebo chemicko-tepelným zpracováním. Při povlakování se na povrchu nástroje vytvoří vrstva v řádech μm z jiného materiálu a to buď pomocí chemických, nebo fyzikálních pochodů. Tloušťka vrstvy neumožňuje ani náznak přebroušení a je proto vhodnější pro nástroje jednorázovějšího typu jako jsou ty ze slinutých karbidů. Pomocí chemicko-tepelného zpracování se povrch sytí vhodným prvkem tak, aby bylo dosaženo vhodnějšího chemického složení. Povrchová vrstva může být nasycena uhlíkem tak, aby se stala kalitelnou, nebo se v ní mohou vytvářet tvrdé karbidy, nitridy nebo boridy.

Ze široké škály chemicko-tepelného zpracování je pro střižné nástroje nejvhodnější nitridace. Povrchová vrstva takto zpracovaných nástrojů je velmi tvrdá tudíž otěruvzdorná a tlaková napětí v ní zabráňují šíření únavových trhlin. Nitridovat lze v prostředí plynném, kapalném nebo v plasmě. Poslední zmíněné prostředí přináší nejvíce výhod, jako je zkrácení délky procesu, minimální rozměrové deformace a zachování kvality povrchu.

Při plasmové nitridaci je využito charakteru doutnavého výboje, ve kterém jsou molekuly nitridační atmosféry štěpeny a urychlovány na nitridovaný povrch. Při dopadu vyřazují atomy z povrchu součásti a zbytkovou energii ji ohřívají. Doutnavý výboj neboli plasma, má plošný charakter, díky němuž celý proces probíhá rovnoměrně. Výsledek nitridace je závislý na mnoha parametrech, od vlastního materiálu nástroje, přes složení nitridační atmosféry, až dobu a teplotu nitridace. Většina z parametrů (vyjma materiálu nástroje) je velmi dobře regulovatelná, což umožňuje dosažení co nejlepšího výsledku. Plasmovou nitridací je možno dosáhnout povrchové tvrdosti až 64 HRC.

Pro ověření výsledků zvolené metody byly porovnány dva vzorky oddělené z nože z materiálu 19 733, z nichž jeden byl ponechán v původním stavu a druhý byl nitridován 15 hodin při teplotě 450 °C. Vizuální kontrola metalografických výbrusů potvrdila zachování původní struktury a vznik cca 0,1 mm tlusté vrstvy na nitridovaném vzorku. Pro podmínky provozu by bylo třeba upravit podmínky tak, aby bylo dosaženo tloušťek 0,4 – 0,6 mm. Měření tvrdosti ukázalo nárůst povrchové tvrdosti 57 HRC na 68 HRC, což je výš než jaký byl původní předpoklad o zachování tvrdosti a tedy i houževnatosti jádra. Lze tedy předpokládat značné zvýšení životnosti.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [1]

1. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
2. COGENT. *Electrical Steel Not Orientated Fully Processed* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://perso.uclouvain.be/ernest.matagne/ELEC2311/T2006/NOFP.pdf>
3. CEMECON. *Povlakování* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.cemecon.cz/povlakovani/>
4. DECKENBACH CZ S. R. O. *Molyduval: Speciální maziva pro tváření kovů bez pnutí* [online]. 2014 [cit. 2015-04-10]. Dostupné také z: http://www.fina-oleje.cz/files/produkty/molyduval/spec_maziva_pro_tvareni_kovu.pdf
5. DOBROVOLNÝ, Bohumil. *Přehled mechanické technologie: nauka o technických materiálech, nástrojích, obráběcích strojích a o výrobě ve strojírenství*. 6. přeprac. vyd. Praha: Práce, 1954. Knižnice techniků a zlepšovatelů.
6. ELUC. *Elektrolýza a její aplikace* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/2285>
7. EMBRNO. *Elektromotory - nástrojarna* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.embrno.cz/cs/vyrobní_sortiment/nastrojarna/
8. HOLEMÁŘ, Alois a Vojtěch HRUBÝ. *Iontová nitridace v praxi: tvrdé a porosní povlaky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1989. Řada strojírenské literatury. ISBN 978-80-903694-5-0.
9. Hospodárnější stříhání statorových a rotorových plechů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2014, (7) [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/hospodarejsi-strihani-statorovych-a-rotorovych-plechu.html>
10. HRUBÝ, Vojtěch. *Přehled materiálového inženýrství*. Ostrava: Kovosil, 2010. Knižnice techniků a zlepšovatelů. ISBN 978-80-903694-5-0.
11. HUMÁR, Anton. *Materiály pro řezné nástroje*. Praha: MM Publishing, 2008. Řada strojírenské literatury. ISBN 978-80-254-2250-2.
12. HUMÁR, Anton. *Technologie I – Technologie obrábění – 1. Část*. Studijní opory pro magisterskou formu studia. VUT – FSI v Brně, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie obrábění. 2003. 138 stran. [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
13. IBC COATINGS. *Ion Plasma / Ion nitriding (DHIN)* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.ibccoatings.com/ion-plasma-ion-nitriding-dhin>
14. KOTOUČ, Jiří. *Tvářecí nástroje*. Praha: České vysoké učení technické, 1993. Řada strojírenské literatury. ISBN 80-010-1003-1.
15. JURČI, Peter. *Nástrojové oceli ledeburického typu*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2009. Řada strojírenské literatury. ISBN 978-80-01-04439-1.
16. MEPAC CZ. *TIG, MIG navařování (svařování)* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mepac.cz/cz/presne-strojirenstvi/tig--mig-navarovani--svarovani->

17. MICHNA, Štefan a Nataša NÁPRSTKOVÁ. *Tváření*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně, 2012. Řada strojírenské literatury. ISBN 978-80-7414-445-5.
18. Moderní metody povlakování nástrojů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2004, (10), 28 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/moderni-metody-povlakovani-nastroju.html>
19. *Moderní výrobní technologie pro 21. století: Modern Production Technologies for the 21st Century : odborná konference při příležitosti 110. výročí založení VUT v Brně*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3914-6.
20. MORÁVEK, Otakar a Vladislav BABOROVSKÝ. *Nástrojové materiály a tepelné zpracování nástrojů*. Praha: SNTL, 1972. Řada strojírenské literatury.
21. MUDROCH, Otakar. *Chromování: tvrdé a porosní povlaky*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1959. Řada strojírenské literatury. ISBN 978-80-903694-5-0.
22. SIEMENS ELECTRIC MACHINES DRASOV. *Brochure* [online]. 27 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby / semd / Documents / Siemens % 20Electric% 20Machines% 20s.r.o.Drasov_20150917.pdf](https://w5.siemens.com/web/cz/cz/corporate/portal/home/produkty_a_sluzby/sem/ Documents / Siemens % 20Electric% 20Machines% 20s.r.o.Drasov_20150917.pdf)
23. SUCHÁNEK, Jan. Možnosti zvýšení životnosti nástrojů pro plošné tváření. *Tribotechnika* [online]. 2012, V(3), 72 [cit. 2016-05-22]. ISSN 1338-0524. Dostupné z: <http://www.tribotechnika.sk/tribotechnika-32012/moznosti-zvyseni-zivotnosti-nastroju-pro-plosne-tvareni.html>
24. Trendy v povlakování slinutých karbidů. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2001, (7), 43 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-povlakovani-slinutych-karbidu.html>
25. Trendy v PVD a CVD povlakování. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2014, (11) [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/trendy-v-pvd-a-cvd-povlakovani.html>
26. VVP MARTIN. *Nástrojárna* [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: <http://www.vvp-martin.cz/Nastrojarna.aspx>
27. Vytváření tvrdých a ořezavzdorných povrchů pomocí boridování. *MM průmyslové spektrum* [online]. 2010, (3) [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [http://www.mmspektrum.com/clanek/vytvareni-tvrdych-a-oteruvzdornych-povrchu-pomoci-boridovani.html](http://www.mmspektrum.com/clanek/vytvareni-tvrdych-a-oreruvzdornych-povrchu-pomoci-boridovani.html)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Stříhání statorových plechů [9].....	9
Obr. 2 Střížný nástroj [26].....	9
Obr. 3 Břitové destičky z SK [19].....	9
Obr. 4 Povlakovaná odvalovací fréza [3].....	9
Obr. 5 Tvar statorových plechů [7].....	10
Obr. 6 Areál výrobního závodu Siemenes Electric Machines Drásov [22].....	10
Obr. 7 Adhezivní opotřebení [12].....	11
Obr. 8 Abrazivní opotřebení [12].....	11
Obr. 9 Opotřebení střížníku [14].....	11
Obr.10 Navaření hrany střížníku [16].....	12
Obr. 11 Princip elektrolytického pokovování. [6].....	12
Obr.12 Princip CVD povlakování [11].....	13
Obr. 13 Schéma napařování [15].....	13
Obr. 14 Schéma napařování [15].....	14
Obr. 15 Schéma iontové implantace [12].....	14
Obr. 16 Závislost hloubky nauhličení na čase [20].....	15
Obr. 17 Závislost tloušťky vrstvy na čase [20].....	15
Obr. 18 Mikrostruktura boridované vrstvy [27].....	16
Obr. 19 Porovnání růstu vrstvy [8].....	17
Obr. 20 Rozložení nitridovaných vrstev [8].....	17
Obr. 21 Závislost změny doutnavého výboje na napětí a plošné hustotě proudu [8].....	18
Obr. 22 Světelný projev doutnavého výboje [13].....	18
Obr. 23 Schéma dílčích procesů při plasmové nitridaci [15].....	19
Obr. 24 Schéma zařízení pro mikropulsní plasmovou nitridaci [15].....	20
Obr. 25 Schéma zvonové nitridační nádoby [8].....	21
Obr. 26 Šachotvá nitridační nádoba [8].....	22
Obr. 27 Kombinovaný recipient [8].....	22
Obr. 28 Měřicí stanoviště.....	24
Obr. 29 Vzorky použité pro měření tvrdosti.....	25
Obr. 30 Výsledky měření tvrdosti.....	26
Obr. 32 Metalografická analýza (zvětšení 200x).....	27
Obr. 32 Metalografická analýza (zvětšení 400x).....	27

SEZNAM TABULEK

Tab.1 Základní parametry vybraných metod.....	16
Tab.2 Hodnoty tvrdosti naměřené na původním vzorku.....	25
Tab.3 Hodnoty tvrdosti naměřené na nitridovaném vzorku.....	25