TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Posouzení kvality protikorozního chromování jader VN spinačů z automatové oceli

Diplomová práce

Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a materiály
Autor práce:	**Bc. Jiří Hájek**
Vedoucí práce:	doc. Ing. Karel Daďourek, CSc. Katedra materiálu

Liberec 2020

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Fakulta strojní

Zadání diplomové práce

Posouzení kvality protikorozního chromování jader VN spinačů z automatové oceli

Jméno a příjmení:	**Bc. Jiří Hájek**
Osobní číslo:	S18000386
Studijní program:	N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor:	Strojírenská technologie a materiály
Zadávající katedra:	Katedra materiálu
Akademický rok:	**2019/2020**

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se s výrobním procesem a požadavky na povrchovou úpravu jader VN spinačů.
2. Odeberte vzorky chromovaného jádra, navrhněte a proveďte vhodné experimenty k posouzení kvality chromovaného povrchu.
3. Výsledky vyhodnoťte a pokuste se stanovit příčiny vznikajících vad a možnosti jejich odstranění.

Rozsah grafických prací:	dle potřeby
Rozsah pracovní zprávy:	50 až 60
Forma zpracování práce:	tištěná/elektronická
Jazyk práce:	Čeština

Seznam odborné literatury:

1. KREIBICH Viktor, HOCH Karel. *Koroze a technologie povrchových úprav*. Praha : ČVUT, 1991. ISBN 80-01-00476-7

2. VOJTĚCH Dalibor. *Kovové materiály.* Praha: VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1

3. KRAUS Václav. *Povrchy a jejich úpravy.* Plzeň: ZČU, 2010

4. TULKA Jaromír. *Povrchové úpravy materiálu.* Brno: VUT, 2005

Vedoucí práce:	doc. Ing. Karel Daďourek, CSc. Katedra materiálu
Datum zadání práce:	1. listopadu 2019
Předpokládaný termín odevzdání:	30. května 2021

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

prof. Ing. Petr Louda, CSc.
vedoucí katedry

V Liberci dne 1. listopadu 2019

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

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

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

19. května 2020 Bc. Jiří Hájek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Karlu Daďourkovi, CSc. za odbornou pomoc při zpracování této práce, ochotu a množství poskytnutých rad, které mi pomohly zcela pochopit problematiku mé diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat panu Tomáši Honcovi za konzultace problematiky z praktického i teoretického hlediska potřebné pro zpracování informací v praktické části práce.

Anotace

Předmětem této diplomové práce je problematika galvanického nanášení povrchové vrstvy chromu. Teoretická část pojednává obecně o technologii a možnostech chromování, včetně vad při něm vznikajících. Experimentální část se pak věnuje problému nekvality povrchu jádra z automatové oceli související s vrstvou tvrdochromu, přičemž je provedena analýza celého výrobního postupu, diagnostika příčin a následný návrh opatření, která mají vzniku nekvality předcházet.

Klíčová slova:

Chrom, chromování, tvrdochrom, galvanické pokovení, povrchové úpravy

Annotation

The aim of this diploma thesis is to analyze problematics of electroplating. This paper is organized as follows. The first, Theoretical part investigates the chromium plating technology, including its options and challenges. The second, Experimental part examines the surface of the core made of free cutting steel and determines its inequality, which is partially caused by hard chrome plating layer. Notwithstandingly, the research of overall production process is conducted and causal diagnostics performed, topped up by recommendation of preventive measures.

Keywords:

Chromium, chromium plating, hard chrome plating, electroplating, surface finishes

Obsah

Seznam zkratek a symbolů 11

Úvod 12

Cíle práce 12

1. Teoretická část 13

1.1. Chrom a jeho použití 13

1.1.1. Chrom jako prvek 13

1.1.2. Oblasti použití chromu 15

1.1.3. Emise chromu 17

1.1.4. Použití chromu pro povrchové úpravy 18

1.1.5. Jednotlivé typy chromování 19

1.1.5.1. Ozdobně ochranné chromování 20

1.1.5.2. Tvrdé chromování 22

1.1.5.3. Mikrotrhlinkové chromování 24

1.1.5.4. Mikroporézní chromování 24

1.1.5.5. Černé chromování 25

1.2. Galvanické pokovování 25

1.2.1. Princip galvanického pokování 25

1.2.2. Postup při galvanickém pokování 26

1.2.3. Funkční galvanické chromování 26

1.2.4. Dokončovací operace chromování 30

1.3. Vady vznikající při tvrdém chromování 31

1.3.1. Závady v adhezi povlaku 31

1.3.2. Vady struktury a barvy povlaku 33

1.3.3. Závady s ohledem na provoz lázně 35

1.4. Alternativy pro tvrdochrom 36

1.4.1. Kompozitní tvrdé chromování 37

1.4.2. HEEF 25 ... 37
1.4.3. Žárové nástřiky HVOF ... 38
1.4.4. Technologie řízené nitridace v ionizované kapalině (CLIN) ... 40
1.4.5. Laser Cladding ... 45
2. Praktická část ... 47
2.1. Funkce dílu ... 47
2.2. Vstupní polotovar ... 48
2.3. Výrobní postup ... 49
2.3.1. Dělení materiálu ... 49
2.3.2. Soustružení ... 49
2.3.3. Povrchová úprava tvrdochrom ... 49
2.4. Analýza vad z výrobního procesu ... 50
2.4.1. Kontrola drsnosti před povrchovou úpravou ... 52
2.4.2. Kontrola drsnosti po povrchové úpravě ... 53
2.4.3. Kontrola povrchové úpravy ... 53
2.4.3.1. Kontrola tloušťky vrstvy ... 54
2.4.3.2. Korozní zkouška v solné mlze ... 55
2.4.3.3. Zkoumání metalografických výbrusů ... 57
2.5. Teorie příčin nárůstu povrchové drsnosti ... 59
2.5.1. Problematika hladící geometrie VBD při soustružení ... 59
2.5.2. Nekvalita povrchové úpravy ... 62
2.6. Nápravná opatření ... 63
2.6.1. Optimalizace procesu soustružení ... 63
2.6.2. Centerless broušení před povrchovou úpravou ... 65
2.6.3. Přeleštění čelních nárůstů chromu na čelech jádra ... 67
2.6.4. Změna parametrů během tvrdého chromování ... 67
2.7. Diskuze odhalených příčin ... 68

3. Závěr 70

Citovaná literatura 71

Seznam použitých obrázků 73

Seznam tabulek 74

Seznam grafů 74

Seznam příloh 74

Přílohy 75

Příloha A – Výřez výrobního výkresu 75

Příloha B – Snímky vzorků z korozní zkoušky NSS 76

Příloha C – Metalografické snímky 78

Seznam zkratek a symbolů

A5	Tažnost pro krátkou tyč
°C	Stupně Celsia
CKS	Kompozitní tvrdochrom s keramickými částicemi
CLIN	Řízená nitridace v ionizované kapalině
EMU	Elektrická osobní drážní jednotka
GDC	Kompozitní tvrdochrom s částicemi diamantu
g/l	Hmotnostní koncentrace
HB	Tvrdost podle Brinella
HV	Tvrdost podle Vickerse
HV 0,1	Tvrdost podle Vickerse při zatížení 0,1 kg
HVOF	Vysokorychlostní žárový nástřik
MPa	Jednotka tlaku
Mt	Jednotka hmotnosti
N	Jednotka síly
NSS	Korozní zkouška v solné mlze
PÚ	Povrchová úprava
Ra	Střední aritmetická odchylka profilu drsnosti povrchu
REACH	Zkratka pro chemickou politiku EU
Rm	Mez pevnosti v tahu
$Rp_{0,2}$	Smluvní mez kluzu určená z trvalé deformace pod zatížením
SEM	Rastrovací elektronová mikroskopie
SEVESO	Směrnice EU o prevenci závažných havárií
SVÚM	Státní výzkumný ústav materiálů
VBD	Výměnná břitová destička

Úvod

Počátky technologie chromování se datují do první poloviny 19. století. První galvanické nanesení chromu úspěšně provedl v letech 1848-1849 Junot de Bussy, který tím odstartoval pomyslný souboj vědců v oblasti vývoje technologie galvanického vylučování povrchové vrstvy chromu. Složení původních elektrolytů se výrazně lišilo od stávajících a technologie jako taková byla krkolomná a z dnešního pohledu složitá. První povlak chromu vyloučený z vodného roztoku kyseliny chromové vytvořil v roce 1856 Anton Geuther, který poprvé aplikoval podobný princip, jako se používá dodnes. K objasnění důležitosti obsahu kyseliny sírové v elektrolytu došlo na přelomu 19. a 20. století, kdy roku 1899 Reese zjistil, že pokud není v elektrolytu přítomná kyselina sírová, chrom se nevylučuje. Patent na poměr kyseliny sírové v elektrolytu získali nezávisle na sobě Colin Garfield Fink a Erik Liebreich. *„První Finkův patent byl přihlášen v roce 1920 a tento rok lze považovat za počátek průmyslového chromování.“* [1]

Tato práce se zabývá technologií, jednotlivými druhy chromování s různým užitným účelem a druhy vad, které při galvanickém nanášení vrstvy mohou nastat. Experimentální část práce pak obsahuje problematiku nekvality jader z automatové ocele s povrchovou vrstvou tvrdého chromu, který je zajištěn v kooperaci. V praktické části je dále popsán výrobní proces a proveden rozbor problematických operací, které mohou nekvalitu způsobovat. V závěrečné části je provedena analýza nejpravděpodobnější příčin a návrh řešení, která mají nekvalitě konečného produktu předcházet.

Cíle práce

Práce vznikla ve spolupráci s firmou Sécheron Hasler CZ spol. s r.o., ve které jsem zaměstnaný. Cílem práce je analyzovat faktory ve výrobním procesu, kvůli kterým dochází k četné nekvalitě. Odhalené vady budou hlouběji prozkoumány a budou stanoveny příčiny, kvůli kterým k nekvalitě výsledného produktu jádra z automatové oceli s povrchovou vrstvou tvrdochromu došlo. Povrchová úprava funkčního chromu je prováděna v kooperaci, z tohoto důvodu bude proces zkoumán hlavně z vnitropodnikového hlediska a budou posuzovány vady, které s povrchovou úpravou souvisí nepřímo. Na základě odhalených příčin vad pak proběhne optimalizace výrobních operací v procesu a budou stanovena nápravná opatření, která budou nekvalitě v praxi předcházet.

1. Teoretická část

1.1. Chrom a jeho použití

1.1.1. Chrom jako prvek

Chrom je stříbrobílý, křehký a neobvykle tvrdý kov s velmi lesklým povrchem. Jeho teplota tání se pohybuje okolo 1900 °C. Jedná se o nejtvrdší elementární kov ze všech. Podle Mohsovy stupnice dosahuje hodnoty 8,5 - 9, je tedy podobně tvrdý jako korund. Pro srovnání se hodnota tvrdosti chromu podle Brinella pohybuje okolo 1120 MPa. [2], [3]

Obrázek 1 - Chrom

Chrom je z hlediska chemických vlastností velice stálý a odolný, což souvisí s jeho schopností pasivace. Čistý chrom se nerozpouští v žádné z běžných kyselin, výjimkou je kyselina chlorovodíková. Chrom obsahující malé procento příměsí je rozpustný v kyselině sírové. Při běžných teplotách okolí nereaguje s žádnými prvky. Za zvýšených teplot reaguje s halogeny, borem, křemíkem, sírou a uhlíkem. [2], [3]

Chrom nekoroduje a chová se jako ušlechtilý kov, protože při oxidačním účinku dochází velmi snadno k jeho pasivaci. Tato vlastnost je klíčová pro jeho technické účely. Pasivace chromu nemá negativní dopad na estetický vzhled a povlaky si uchovávají svůj lesk. Povrch chromu je obtížně smáčivý, což znamená, že odpuzuje mastnotu, vodu a nečistoty. [4]

Na Zemi se chrom vyskytuje v relativně hojném zastoupení. Objevuje se ve všech oxidačních stavech od -2 do +6, ale běžně se vyskytují pouze stavy 0 (kovový chrom), +2, +3 a +6. Nejstálejší oxidační stav u sloučenin je Cr3+ a Cr6+ (chromany), jinak nazývaný trojmocný a šestimocný chrom, který vykazuje silné oxidační účinky. [4]

V přírodě se chrom může vyskytovat jako ryzí kov, ale ve většině případů je součástí minerálů. Nejčastějšími minerály, které chrom obsahují, jsou rudy chromit neboli podvojný oxid železnato-chromitý (FeO·Cr2O3) a krokoit, také nazývaný chroman olovnatý (PbCrO4). Úplně nejvyšší obsah chromu (cca 87,5 %) se v přírodě vyskytuje ve vzácném ferchromidu (Cr3FeO4). [4]

Světová těžba chromitu (FeCr2O4) dosáhla v roce 2015 podle odborného odhadu 27 Mt. Tato obchodovaná ruda (chromit) obsahuje okolo 40 až 45 % Cr2O3. Jihoafrická republika těží více než polovinu veškeré světové produkce a má největší zásoby této rudy na světě. Mezi další producenty chromu patří Indie, Kazachstán a Turecko. Z evropských zemí se chromit těží pouze ve Finsku. V České republice se nevyskytují žádná naleziště chromových rud. [5]

Nejběžnějším postupem získávání chromu z rudy je redukce chromitu uhlíkem (koksem) v elektrické nebo Siemens-Martinské peci:

$$FeCr_2O_4 + 4C \rightarrow Fe + 2Cr + 4CO. \qquad (1)$$

Na konci tohoto metalurgického procesu vzniká slitina chromu se železem nazývaná ferochrom. Ferochrom je možné přímo používat například na legování speciálních slitin a ocelí, které obsahují železo a chrom. Proces výroby čistého chromu je o poznání složitější. Čistý chrom se získává redukcí Cr2O3 křemíkem a vápníkem, nebo elektrolýzou kyseliny chromové (H2CrO4). [2]

1.1.2. Oblasti použití chromu

Chrom se používá v různých oblastech průmyslu. V kožedělném průmyslu se používají soli chromu pro zpracování kůže na tzv. useň. Textilní průmysl používá kyselá chromová barviva v kombinaci s dichromanem draselným na barvení vlny. Chemický průmysl používá sloučeniny chromu při výrobě nátěrových hmot, pigmentů a k obarvování smaltů. Uplatnění chromových sloučenin jako barviv se aplikuje také ve sklářském průmyslu, kde se používá výhradně k barvení zeleného obalového skla a v keramickém průmyslu je součástí barvítek. [4], [6]

Největší zastoupení chromu je ve strojírenském průmyslu v oblasti metalurgie, konkrétně při výrobě legovaných ocelí za účelem zlepšení následujících vlastností:

- Nárůst korozivzdornosti (u ocelí obsahující více než 12 % Cr),
- zvýšení otěruvzdornosti a tvrdosti,
- zvýšení tvrdosti po kalení nástrojových ocelí (Kromě ocelí se chrom za účelem zvýšení tvrdosti také přidává do mosazi.),
- zajištění žáruvzdornosti a žárupevnosti. [2]

Čistý chrom se používá pro povrchovou úpravu chromování, která slouží jako protikorozní ochrana. Kromě korozní ochrany podporuje chromovaný povrch také estetickou stránku výrobku, protože si udržuje velmi pěkný lesklý vzhled, ke kterému dochází při vlastní pasivaci v běžném atmosférickém prostředí. Chromovaná povrchová úprava se používá u vybavení koupelen (např. na baterie, madla), na zařízení a nástroje používané v medicíně, nebo zdobí součásti automobilů (světlomety, zrcátka, ozdobné prvky jak v interiéru, tak exteriéru apod.) [2]

Ve sloučeninách se chrom vyskytuje v mocenstvích Cr+2, Cr+3 a Cr+6, výjimečně v mocenství Cr+4 nebo Cr+5. Sloučeniny trojmocného chromu jsou charakteristické zelenou barvu, typicky oxid chromitý Cr_2O_3 (nazývaný chromová zeleň), který se používá jako zelený barevný pigment viz obrázek níže. [4]

Obrázek 2 - Oxid chromitý

Trojmocné sloučeniny vykazují chemickou stálost a využívají se především v kožedělném průmyslu jako činidla a ve sklářském průmyslu jako barviva k obarvování skla. [4]

Šestimocný chrom se vyskytuje ve sloučeninách, které se nazývají chromany a dichromany. Chromany mají charakteristickou žlutou barvu, dichromany jsou specifické barvou oranžovou. Mezi chromany patří např. chroman barnatý $BaCrO_4$ známý pod názvem žlutý ultramarín a chroman olovnatý $PbCrO_4$, také nazývaný chromová žluť, které se používají jako barviva. [4]

Chromany a dichromany jsou zdraví škodlivé. Krátkodobá expozice může způsobovat zdravotní obtíže v místě, kde došlo ke kontaktu. Kontakt může způsobit například vředy na kůži při pouhém dotyku. Jeho vdechnutí způsobuje perforace nosní přepážky, podráždění nosní sliznice, nebo astmatické obtíže. Při spolknutí způsobuje podráždění trávicího ústrojí a může také zapříčinit onemocnění jater a ledvin. Chrom je považován za lidský karcinogen, který způsobuje rakovinu plic. Významnou protilátkou je vitamín C (kyselina askorbová), který Cr^{6+} převádí redukcí na netoxické sloučeniny trojmocného chromu Cr^{3+}. [4], [6]

Chrom má ale i biologický význam. Cr3+ patří mezi stopové esenciální prvky, které figurují v metabolismu savců. Mezi jeho pozitivní účinky patří zvyšování účinnosti inzulínu, které má za důsledek udržování metabolizmu tuků, cholesterolu a glukózy. Nedostatek chromu může způsobit úbytek váhy, únavu, vyvolávat stres a snižovat schopnost těla odstraňovat glukózu z krve. Doporučená denní dávka chromu je 0,1 mg. Stopy chromu se nacházejí např. v pivě, kvasnicích, červené řepě a lesních plodech. [4]

1.1.3. Emise chromu

Trojmocný chrom se ve velkém množství dostává do ovzduší v podobě prachových částicích, které se uvolňují během spalování fosilních paliv. Mezi další významné zdroje chromu patří spalovny komunálních odpadů, výfukové plyny z automobilů s katalyzátorem, polétavý azbest (který se uvolňuje při brždění z opotřebovaných brzdových uložení automobilů), cementárny (cement obsahuje chrom) a emise z klimatizačních chladících věží, protože se u nich sloučeniny chromu používají jako inhibitory koroze. Do ostatních složek životního prostředí se chrom dostává atmosférickou depozicí. [4]

Do vody se chrom dostává skrze průmyslové odpadní vody z povrchové úpravy kovů, barevné metalurgie, kožedělného a textilního průmyslu, kde je chrom součástí některých barvicích lázní. [4]

Dalším zdrojem mohou být některé inhibitory koroze, které se používají v chladicích okruzích, při rozvodu teplé vody nebo při čištění kotlů. Chrom se také značně koncentruje ve vodách, které se používaly u hydraulické dopravy popílků. Chrom může do podzemní vody nebo půdy unikat i ze špatně zabezpečených skládek. Může se také uvolňovat do prostředí při zpracování odpadů s obsahem chromu (odpadní kaly, komunální odpad, odpady z pokovování a zpracování chromu). Chrom je obsažen i v některých výrobcích denní spotřeby jako jsou například některá barviva, inkousty (tonery pro tiskárny), papír, výrobky z kůže, některé podlahové krytiny, magnetické pásky, baterie, svíčky a nekorodující oceli. [4]

Pro zdravotní škodlivosti šestimocného chromu byly pro ČR stanoveny limity tolerované koncentrace chromu v pracovním prostředí. V EU je od roku 2006 zaveden trend omezování množství chromu v elektrotechnických a elektronických zařízeních a jsou zaváděny alternativní technologie, které množství chromu omezují nebo nahrazují úplně. [4]

1.1.4. Použití chromu pro povrchové úpravy

Chrom se v povrchové vrstvě používá v případech, kdy je požadována korozní odolnost, zvýšená tvrdost a otěruvzdornost součástí. Proto se často používá jako povrchová úprava strojírenských nástrojů pro řezání, tažení a formování za studena. Dále se chromová povrchová úprava používá u měřidel, strojních součástí namáhaných na otěr (hřídele a ozubená kola) a součástí pro letecký nebo automobilový průmysl, u kterých se předpokládá především mechanické namáhání za současného působení vysokých teplot a chemických vlivů z paliv nebo zplodin (např. součásti motorů, jako válce, vložky do válců a pístní kroužky). [1], [7]

Povlak chromu odolává poměrně širokému pásmu pracovních teplot. Tvrdost a otěruvzdornost si vrstva zachovává i při teplotách nad 200 °C, k degradaci těchto vlastností dochází až při teplotách nad 400 °C. Chrom má jednou z nejvyšších tepelných vodivostí u kovů. Vyšší tepelné vodivosti dosahují pouze měď, stříbro a zlato. [1], [8]

V povlaku chromu dochází ke koncentraci tahového pnutí, které vzniká během procesu depozice uvolňováním vodíku a rozpadem intermediálních Cr-H fází. Tohle tahové pnutí způsobuje snížení únavových vlastností povlakovaných součástí, které může mít za následek až 40 % pokles únavové odolnosti. Aby se minimalizovalo vnesené tahové pnutí, které vzniká při obrábění povrchu a během procesu povlakování nemohlo dojít k vodíkové křehkosti povlaku, je před a po povlakování často zařazena operace tepelného zpracování na odstranění vodíkové křehkosti a ke snížení pnutí. [8]

Tahové napětí způsobuje v Cr povlaku utváření jemných mikrotrhlin, které utvářejí spojitou síť. V případě, že praskliny (mikrotrhliny) v povrchové vrstvě procházejí celou tloušťkou povlaku až k základnímu materiálu, přestává být vrstva chromu efektivní proti vzniku koroze, která se díky tomu může dostat až k základnímu materiálu. Pokud jsou praskliny mělké, jemné a hustě rozložené, nesnižují korozivzdornost a pro aplikaci u kluzných uložení jsou naopak přínosem (např. hydraulické válce), protože napomáhají udržet na povrchu olejovou vrstvu, která vyplňuje mikrotrhliny a tím snižuje koeficient tření. Povlaky, které praskliny neobsahují vůbec, jsou z hlediska korozivzdornosti nejvýhodnější, ale absence prasklin má za následek nízkou tvrdost a otěruvzdornost. V takovém případě povlak ztrácí své jiné užitné vlastnosti a je prakticky nevyhovující. [8]

Přestože chrom není ušlechtilým kovem, vykazuje díky schopnosti vlastní pasivace vlastnosti jako kov ušlechtilý. Pasivace chromu zabraňuje korozi a vzniká i při malých oxidačních účincích jako je vzdušná vlhkost. Díky tomu si chrom trvale uchovává svůj lesklý povrch. Chromový povrch je také nesnadno smáčitelný, odpuzuje mastnotu, vodu a vodné roztoky, čímž se zvyšuje jeho odolnost proti korozi, ale na druhé straně tyto vlastnosti neumožňují jeho pájení. Chromové povlaky je možné nanášet na řadu materiálů. Mezi základní materiály patří převážně ocel (i některé druhy nerezové), dále měď, mosaz a litina. [1]

1.1.5. Jednotlivé typy chromování

V praxi využíváme následující druhy chromování:

- Ozdobně ochranné chromování,
- tvrdé chromování,
- mikrotrhlinkové chromování,
- mikroporézní chromování,
- černé chromování. [1]

1.1.5.1. Ozdobně ochranné chromování

Jak již z názvu vyplývá, jedná se o povrchovou úpravu, která má kromě ochrany i estetický účel. Využívá se vlastnosti pasivace chromu, při které si povrch v oxidačním prostředí zachovává svůj lesk. [9]

Pro dekorativní účely stačí poměrně tenká vrstva povlaku, která se pohybuje v řádech desetin mikronu (0,2 až 0,8 μm). [9]

Pro vznik lesklého chromového povlaku je podmínkou lesklý podklad, na který se chrom nanese. Kvůli lesku je vhodné do předúprav zařadit operace jako je tryskání, omílání, broušení a leštění. Povlak se skládá z více vrstev a pro dosažení lepšího lesku a drsnosti povrchu je vhodné leštit mezioperačně i jednotlivé mezivrstvy. U ocelových předmětů se jako mezivrstva používá povlak mědi a to v případě, že není kladen požadavek na odolnost v agresivním prostředí. Pokud by mohl být předmět vystaven agresivnímu prostředí, tak se používá povlak niklu. [9], [10]

Obrázek 3 - Dekorativně ochranná úprava nádrže [Vladimír Janovský – renovace motocyklů JAWA]

V případě použití niklové mezivrstvy je velice důležité součásti důkladně opláchnout a ihned vložit do chromovací lázně, protože by během osychání mohlo dojít k pasivaci a nebyla by zaručena kvalitní souvislá vrstva chromu. [10]

Chromovací lázně pro dekorativní chromování obsahují 350 až 450 g CrO_3 na litr lázně a 0,6 až 1,2 % H_2SO_4 (vztaženo na hmotnostní obsah CrO_3). [10]

Technologie dekorativního chromování, u které jsou lázně tvořeny sloučeninami chromu ve třetím oxidačním stupni, se používá již více než 40 let. Principiálně lze elektrolyty pro dekorativní chromování na bázi CrO_3 rozdělit do dvou skupin. První skupina je na chloridové bázi, druhá skupina má základ výhradně síranový. Na počátku technologie se oba systémy technologií potýkaly s problémy. Odstín výsledného povlaku se svou barvou lišil od klasické, doposud používané technologie. Nové postupy se také potýkaly i s řadou provozních záludností, které negativně ovlivňovaly kvalitu finálního povlaku. Síranový typ chromovací lázně se ukázal jako provozně jednodušší a nevyžadoval tak náročnou obsluhu a údržbu. Samotný síranový elektrolyt není agresivní vůči technologickému zařízení lázně a nevyžaduje ani chlazení při vlastním procesu chromování. Velmi podstatnou výhodou této technologie, je pak výsledný barevný odstín, který je téměř nerozpoznatelný od odstínu povlaku vyloučeného v klasické chromovací lázni na bázi chromových solí. [11]

Z estetického hlediska, které je pro dekorativní chromování podstatným parametrem, lze kromě klasického světlého odstínu chromového povlaku vylučovat různý stupeň kouřového zabarvení a tím napodobovat povlaky, které jsou tvořeny jiným kovem. Například lze pomocí kouřového zabarvení dosáhnout imitace barev podobných antracitovému niklu, rutheniu a paládiu. Povlaky na bázi sloučenin chromu ve třetím oxidačním stupni lze výhodně kombinovat s různými variantami galvanických povlaků niklu (jako jsou pololesklé, lesklé a saténové) a vytvářet tak nové trendy, které si díky estetice a funkčním vlastnostem nacházejí uplatnění především v automobilovém a nábytkářském průmyslu, kde je na design kladen relativně vysoký důraz. Velkou výhodou je snadné zavedení této technologie, protože lze jednoduše implementovat do linek, které používaly technologii odlišnou. Velmi se totiž podobá lázním niklovacím. Elektrolyty na bázi CrO_3 v praxi používají přední světový výrobci automobilů jako Renault, Nissan, BMW a další. V Evropě je tato technologie nejvíce rozšířená ve Francii, Itálii, Německu, Španělsku a Velké Británii, dále pak mimo Evropu především v USA. Nejpoužívanější typy lázní jsou lázně Twilite a TriMac III. [11]

Twilite lázně

Jedná se o dekorativní síranovou chromovací lázeň na bázi sloučenin třívalentního chromu. Výsledné produkty mají středně tmavé chromové povlaky s estetickým kouřovým efektem. Provoz lázně je nenáročný a snadno se udržuje ve stanovených parametrech. Tento typ lázně je zcela kompatibilní s většinou niklovacích lázní. Kromě automotive je tato lázeň také oblíbená a využívaná v nábytkářském průmyslu. Automobilový průmysl tento povlak využívá spíše pro speciální luxusní vozidla. V České republice není zatím provozně nasazena. V Evropě je provozována především v Itálii, Španělsku a ve Velké Británii. [11]

TriMac III lázně

TriMac III je taktéž dekorativní chromovací lázeň síranového typu na bázi CrO3. Disponuje širokou škálu operačních parametrů a zvýšenou vylučovací rychlostí. Barevný odstín chromového povlaku je téměř k nerozeznání od barevného odstínu povlaku, který vznikl pomocí klasických chromovacích elektrolytů s obsahem zdravotně nebezpečných sloučenin chromu v šestém oxidačním stupni. Oproti klasickým chromovacím lázním dosahuje mnohem vyšší katodické proudové účinnosti v nižších proudových hustotách. Za nevýhodu by se dala považovat citlivost lázní na znečištění způsobené obsahem železa. Pro bezproblémový průběh pokovování je zásadní udržovat jeho obsah v koncentraci do 20 mg/l. Regulace koncentrace se provádí pomocí odstraňování iontů železa pomocí měničů iontů tzv. ionexových kolon. Povlaky vyloučené z tohoto typu elektrolytů mají nízkou pasivitu povlaku po vyloučení a je tedy nutné pokovené díly nechat po dobu cca 48 hodin v teple a suchu, aby došlo k vytvoření přirozené pasivační vrstvy. [11]

1.1.5.2. Tvrdé chromování

Tvrdochrom se používá jako protikorozní ochrana základního materiálu a současně také jako ochrana proti mechanickému poškození (těchto vlastností spolehlivě dosahuje od tloušťky vrstvy 20 μm). [1], [10], [12]

Pro tyto vlastnosti se tvrdé chromování používá hlavně pro snížení opotřebení a ochranu namáhaných součástí, měřidel a nástrojů. Využívá se také v opravárenství, kde se u součástí, které se kvůli opotřebení pohybují na dolní toleranci rozměru, doplňuje úbytek materiálu. [1], [10]

U tvrdého chromování jsou oproti dekorativnímu tloušťky vrstvy výrazně tlustší a pohybují se od jednotek mikronů až po jednotky milimetrů. Tvrdost povlaku se podle Vickerse pohybuje mezi 800 a 1200 HV. Povlaky větších tlouštěk je možné dále opracovávat. [10]

Tvrdým chromováním lze zušlechťovat i méně jakostní materiály a tím získat lepší vlastnosti, čehož se využívá např. u vnitřních stran forem pro lisování a funkčních ploch kalibrů. [1], [10]

Obrázek 4 - Aplikace tvrdého chromování [BOMEX - CZ s.r.o.]

Při tvrdém chromování se chromuje přímo na základní materiál bez použití mezipovlaku. Povrch se před nanesením povrchové úpravy musí očistit od mastnoty, rzi a musí se aktivovat pomocí anodického leptání v téže lázni, kde se bude chromovat. Při leptání se pouze mění polarita závěsů. Aktivace trvá cca 1 minutu při teplotě lázně přibližně 55 °C a stejné proudové hustotě jako při chromování. Leptání ve stejné lázni však způsobuje její znehodnocení (dostává se do ní větší množství železa). Proto se pro leptání častěji využívají staré znehodnocené lázně. [10]

Běžné lázně pro tvrdé chromování obsahují koncentraci 250 až 350 g CrO3 na litr lázně a 1,0 až 1,2 % H2SO4 (v závislosti na hmotnostním obsahu CrO3). V lázni lze nahradit sírany za fluoridy a fluorokřemičitany, které umožňují používat vyšší proudové hustoty, čímž se urychluje vylučování povlaku, stoupá hloubková účinnost lázně a zvyšuje se proudový výtěžek. Teplota lázně je stejná jako při aktivaci, tedy 55 °C. Pro lepší průběh procesu je vhodné lázeň mírně promíchávat stlačeným vzduchem. [1], [10]

1.1.5.3. Mikrotrhlinkové chromování

U mikrotrhlinkového chromování se jako podkladová vrstva používá niklový povlak, na který se nanáší dvě vrstvy povlaku chromového. Jako první se nanáší vrstva chromového povlaku, který neobsahuje trhlinky. Druhá vrstva chromu už je běžná s trhlinkami. Ve dvojité vrstvě vznikají díky působení silného vnitřnímu pnutí mikrotrhlinkové struktury, kde každá z mikrotrhlinek funguje jako mikroskopický galvanický článek. Díky mnoha dílčím galvanickým článkům se výsledné napětí rozkládá na velmi malé. Toto nízké napětí nestačí k rozpuštění podkladové vrstvy a tím prakticky dochází k zamezení koroze. [9], [10], [12]

1.1.5.4. Mikroporézní chromování

Podklad tvoří povlak, který vzniká v niklovací lázni a obsahuje nevodivé částice karbidu křemíku (tento povlak se nazývá nikl-seal). Tyto nevodivé částice jsou pak zabudované v jednotlivých pórech povlaku. Pro optimální ochranu vůči korozi se na povlak nikl-seal (který obsahuje 20 tisíc mikročásteček na 1 cm^2) nanáší povlak chromu o tloušťce 0,25 mm. Po nanesení povlaku chromu se vytvoří stejné množství mikročlánků s minimálním napětí, čímž se zamezuje korozi podobně jako u mikrotrhlinkového chromování. [9], [12]

1.1.5.5. Černé chromování

Uplatnění pro černé chromové povlaky se našlo především v optickém a spotřebním průmyslu. Pro odstranění černého odstínu a získání lesku stačí nepatrný otěr. Jako podkladovou vrstvu je možné použít všechny běžné povlaky. [12]

Na vyloučení černých chromových povlaků postačí běžná chromovacích lázeň, u které se zvýší proudová hustota. Povlak, který se tímto způsobem vyloučí, obsahuje vysoké množství oxidů. [12]

Černého chromu lze také dosáhnout v lázni bez obsahu kyseliny sírové za přítomnosti anhydridu kyseliny chromové a nepatrného množství karbonových kyselin, např. kyseliny octové. Pro vyloučení černého chromu se používají nižší teploty lázně než u běžného chromování. Teplota takové lázně se pohybuje okolo 20 °C. [12]

1.2. Galvanické pokovování

1.2.1. Princip galvanického pokování

Během galvanického neboli elektrochemického pokovování vzniká kovový povlak na povrchu součástí pomocí elektrolýzy. [9]

Pokovovaná součást musí být před samotným procesem pokovování zbavena mastnoty a nečistot. V galvanické lázni, kterou tvoří roztok soli kovu, je součást umístěna na záporný pól (katodu). Kladným pólem (anodou) je kovová deska, která se rozpouští a pokovuje tak součást na katodě. Kvůli jejímu rozpouštění při procesu se také nazývá „ztracená anoda“. [9]

Díky působení elektrického proudu se kladně nabité ionty kovu přemisťují ze solného roztoku směrem k součásti, kde přibírají elektrony a stávají se z nich neutrální atomy kovů. Takové atomy ulpívají na povrchu pokovované součásti (připojené na katodě) a vytváří zde souvislý povlak kovu z anody. [9]

Při galvanickém pokovování vzniká riziko, že povlak utvářený na anodě nebude dosahovat pravidelné tloušťky. [9], [10]

1.2.2. Postup při galvanickém pokování

Proces galvanického pokovení provázejí přípravné a dokončovací operace, které zajišťují dobrou přilnavost nanášené vrstvy na základní materiál a podporují jeho výslednou kvalitu.

Technologický postup galvanického pokovení je následující:

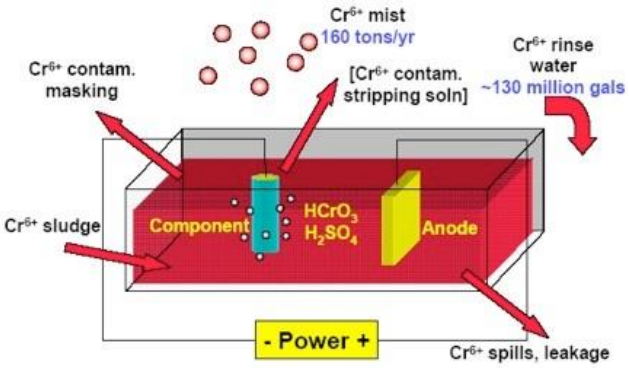
- chemické odmašťování,
- oplach,
- elektrochemické odmašťování,
- oplach,
- moření,
- oplach,
- dekapování,
- vlastní pokovení,
- oplach,
- sušení. [9]

1.2.3. Funkční galvanické chromování

Funkční chromování neboli tvrdochromování, tvoří velmi rozšířenou metodu chromování, jejíž cílem je vyloučení tvrdé a otěruvzdorné vrstvy chromu. Tyto vrstvy plní především technický účel a dosahují tlouštěk od jednotek μ do jednotek mm. Vyloučení funkčních vrstev chromu probíhá v řádu hodin. [13]

Od zavedení první průmyslové aplikace chromování uplynulo již sto let. Jak bylo zmíněno v úvodu, počátky chromování se datují od roku 1920. Jako nosná a základní složka chromovacích lázní se stále používá oxid chromový. [13]

Pro funkční chromování se používá jeho koncentrace v rozmezí 200-300 g/l (za optimální koncentraci se považuje střední hodnota 250 g/l), protože se při této koncentraci dosahuje nejvyššího katodového proudového výtěžku. Jako primární katalyzátor se stále používají sírany, které se do lázně přidávají ve formě kyseliny sírové. Paradoxně i znečistění sírany u používaného oxidu chromového působí katalyticky. [13]



Obrázek 5 - Schéma procesu chromování [Surftech Engineering Pvt. Ltd.]

U první generace chromovacích lázní působil v roli sekundárního katalyzátoru chrom ve třetím oxidačním stupni. Jeho koncentrace u pracovního elektrolytu se optimálně pohybovala v rozmezí 3 až 5 g/l. [13]

U druhé generace byly do lázní přidávány fluoridy nebo komplexní soli obsahující fluoroboritanový či fluorokřemičitanový aniont. Přítomnost těchto látek v lázni měla za pozitivní následek zvýšení katodového proudového výtěžku, ale na druhou stranu negativně ovlivnila agresivitu elektrolytu vůči základnímu materiálu. Agresivní elektrolyt způsoboval zvýšené rozpouštění základního materiálu (především v něm obsaženého železa) do chromovací lázně a tím postupně docházelo k jejímu znehodnocování. Nárůst balastních kovů v lázni negativně zvyšoval svorkového napětí a tím docházelo ke zvýšené spotřebě elektrické energie, tedy neúspornosti procesu. [13]

Nejnovějším trendem v oblasti vývoje chromovacích lázní jsou organické katalyzátory používané u třetí generace. Nejhojněji používaný sekundární katalyzátor jsou alkyl sulfonované kyseliny a jejich deriváty. Používají se v kombinaci s primárním katalytickým účinkem síranů. [13]

Oproti ostatním způsobům galvanického pokovování se galvanické chromování liší. Chrom totiž není dodáván do lázně z rozpouštějící se anody, nýbrž je dodáván ve formě aniontu v elektrolytu tvořeném kyselinou chromovou. Pokud by byla jako zdroj chromu v lázni použita chromová anoda, docházelo by k tvorbě chromu ve formě trojmocného kationtu Cr3+, což ve větším množství není žádoucí, protože pro vylučování povlaku na povrchu součásti je v lázni nezbytná přítomnost chromu v šestimocné formě. [9], [14]

V chromovacích lázních se tak používají anody nerozpustné, na které se většinou používá olovo obohacené různými legujícími prvky (Sb, Sn ap.). Pro práci za vyšších proudových hustot je nejvýhodnější použití tzv. chrominových anod (olovo legované stříbrem), které nejsou náchylné k pasivaci. Zdrojem kyseliny chromové H2CrO4 bývá oxid chromový CrO3, který se mísí s vodou. Kvůli udržení stálého složení lázně se oxid chromový do lázně doplňuje i během procesu chromování. Při nasazování lázně se dodává určité množství trojmocného chromu, které v lázni zůstává. Nasazené množství trojmocného chromu Cr3+ je pak udržováno pomocí rovnováhy mezi redukcí Cr6+ na katodě a oxidací Cr3+ na anodě. Redukce oxidu chromového na katodě způsobuje vznik neprodyšných filmů, které zabraňují difuzi dalších chromových iontů ke katodě. [9], [14]

Galvanicky utvořený chromový povlak se na součásti aplikuje ponorem do lázní, jejichž složení se může lišit podle požadovaných vlastností chromového povlaku. Obsah kyseliny sírové v chromovacích lázních zvyšuje stálost a snižuje agresivitu lázně. Na druhé straně obsah fluoridů a fluorokřemičitanů v chromovacích lázních zvyšuje proudový výtěžek a celkově zrychluje celý proces vylučování chromu oproti lázním s obsahem kyseliny sírové, což příznivě ovlivňuje ekonomickou stránku procesu chromování. S jejich používáním se ovšem pojí i několik nevýhod. Poréznost katodového filmu nepříznivě ovlivňuje přítomnost cizích aniontů v lázni, především síranů, fluoridů a fluorokřemičitanů. S procesem galvanického chromování se obecně pojí problémy týkající se zneškodňování odpadních vod s obsahem nebezpečných látek. [9]

Pro zlepšení přilnavosti chromového povlaku se povrch před vlastním chromováním aktivuje. Nejčastěji se aktivace provádí otočením polarity (anodickým leptáním) přímo v chromovací lázni, výhodnější je však mít pro aktivaci vyhrazenou starou znehodnocenou chromovací lázeň kvůli zmíněném znečišťování lázně (viz kapitola 1.1.5.2). Zároveň se samotný proces pokovení nebude leptáním brzdit. Nízká hloubková účinnost chromovacích lázní umožňuje během procesu chromování využívat přídavné přípravky s pomocnými katodami a anodami. Jako ochrana povrchů součásti, které nejsou určeny k chromování, se používají izolační pásky nebo snímatelné laky. [9]

Obrázek 6 - Příklad chromovací lázně [Flowline, Inc.]

Vlastnosti výsledného chromového povlaku negativně ovlivňuje vznik vodíku, k jehož tvorbě dochází při vylučování chromu na katodě. Při reakci vodíku s chromem vznikají velmi labilní hydridy (CrH2, CrH3 ap.). Při jejich následném rozkladu vzniká vodík, který se stává součástí vyloučeného chromového povlaku a způsobuje nežádoucí zvýšení křehkosti spojené s prudkým nárůstem tvrdosti. Přítomnost vodíku ve chromovém povlaku vyvolává objemové změny, které mají za následek velký nárůst vnitřního pnutí, které způsobuje vznik většího či menšího počtu trhlinek. Porušení soudržnosti povlaku vlivem trhlinek lze předcházet dodržením ideálních pracovních podmínek, nebo použitím speciálních přísad. [9]

U chromovací lázně může dojít i k tzv. vyčerpání, tedy degradaci lázně, při kterém dojde k zastavení procesů vylučování chromu na základní materiál, protože z lázně vyprchaly látky, které jsou pro vylučování chromu nepostradatelné. Jinými slovy dojde k vyprchání elektrolytu, který tvoří oxid chromový a katalyzátory jako jsou kyselina sírová, fluoridy a komplexní soli. Přísady z lázně unikají společně s vodíkem ve formě kyselého a velmi agresivního aerosolu do ovzduší. Pro omezení úniku aerosolu jsou do lázně přidávány speciální tenzidy, které vytvoří na hladině lázně nízkou pěnu, ve které podstatná část aerosolu zůstane. [15]

Zastavení vylučování chromu mohou také způsobit tzv. balastní kovy, které do lázně unikají při rozpouštění základního materiálu pro pochromování. Jedná se o nechtěnou složku chromovacích lázní a jsou tvořeny především železem a některými těžkými kovy. Mezi kovové nečistoty se započítává i rozpuštěný třívalentní chrom. Nárůst nečistot v lázni způsobuje snížení proudového výtěžku, snížení vodivosti lázně, nebo zvýšení svorkového napětí, které způsobí podstatné zvýšení spotřeby elektrického proudu. Za kritickou se považuje koncentrace balastů v rozmezí 17-20 g/l. Při této koncentraci lázeň prakticky přestává chromovat. [15]

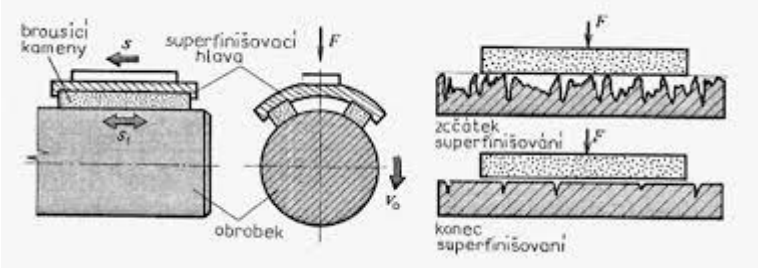
1.2.4. Dokončovací operace chromování

Povrchy, které prošly procesem galvanického vyloučení vrstvy tvrdochromu, se dále musí mechanicky ošetřit, aby dosáhly požadovaných vlastností kvality. Například pro válce spalovacích motorů se používá technologie honování pro vnitřní průměry a u vnějších ploch (pístní kroužky a dříky ventilů) se jako dokončovací operace používá broušení. Pro vysokou tvrdost povrchové vrstvy není na dokončovací operace možné používat nástroje z běžných materiálů. [16]

Například u technologie honování se aplikuje zpravidla proces rozdělený na tři stupně. Pro první stupeň tzv. předhonování se jako honovací nástroj používají diamantové lišty a pro druhý stupeň tzv. mezihonování se využívá honovacích kamenů z karbidu křemíku o velikosti zrn v rozmezí 95 až 120 µm. Při konečném honování se používají kameny se zrnitostí 17 µm. Honovací kameny se pro tyto účely mohou napustit sírou

nebo voskem, díky čemuž během honování vzniká mezi obrobkem a honovacím kamenem kluzný film, který pozitivně ovlivňuje kvalitu obrobené plochy, opotřebení nástroje a odvod třísek. [16]

Broušení vnějších ploch se také provádí ve více stupních a to zpravidla ve stupních dvou. Při broušení nahrubo i načisto se jako brusný nástroj používají korundové brusné kotouče (stupeň čistoty 95 až 96 % Al2O3) s pojivem ze syntetické pryskyřice. Velikost zrn korundu použitých na hrubování je 80 µm a pro broušení načisto se pohybuje kolem 48 µm, čímž lze dosáhnout mimořádně nízké drsnosti povrchu až Ra 0,1. [16]



Obrázek 7 - Schéma dokončovacího obrábění [16]

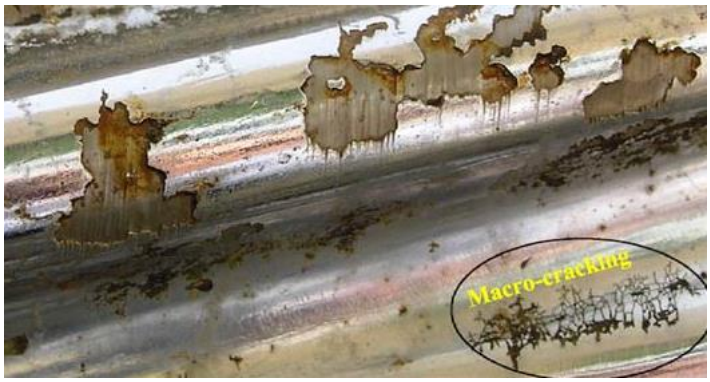
1.3. Vady vznikající při tvrdém chromování

Vady u vrstev tvrdochromu souvisí jak s předúpravou podkladového materiálu, tak s podmínkami, za kterých byl chrom na materiál nanášen. Chyby a závady při tvrdém chromování se dělí na závady související s adhezí povlaku, vady struktury a barvy povlaku a na vady, které souvisejí s provozem lázně. [17]

1.3.1. Závady v adhezi povlaku

Tento typ vady souvisí se špatnou přilnavostí vrstvy chromu s podkladovým materiálem. Závady v adhezi povrchové vrstvy jsou doprovázené občasnými prasklinami, které vznikají z několika příčin. Jednou z příčin může být kolísavá teplota chromovací lázně a to hlavně s klesavou tendencí, kdy je způsobena špatná soudržnost chromové vrstvy se základním matriálem příliš nízkou teplotou lázně a vysokou hustotou proudu. [17]

Doprovodné praskliny, které mohou při kolísání teploty a vysoké proudové hustotě vznikat, jsou způsobeny křehkostí vrstvy, kterou může kromě parametrů lázně způsobovat i špatná předúprava chromovaného dílu, jako špatně provedené kalení, nebo tepelné ovlivnění (zakalení povrchové vrstvy) při opracování a nedokonalé ohranění dílu. [17]



Obrázek 8 - Příklad vady v adhezi vrstvy s výskytem makrotrhlin [Engineering Failure Analysis]

Aby se těmto projevům předcházelo, je důležité dodržovat správnou teplotu lázně a správnou proudovou hustotu. Co se týká chromovaného dílu, je lepší ověřit si povrchovou tvrdost po kalení a díl při finišování dostatečně chladit, aby nebyl při dokončovacích operacích tepelně ovlivněn. Samotné opracování je také důležité důkladně kontrolovat proti náběhům na hranách dílu. [17]

Povlak tvrdochromu se může loupat už během samotného procesu chromování nebo při následujícím přebroušení. Takové chování způsobuje nedostatečné odmaštění a dlouhé nebo naopak krátké časy leptání povrchu. Z tepelných předúprav je to pak nepřiměřeně dlouhé kalení. [17]

Loupání vrstvy během procesu chromování lze zabránit zvýšením napětí v odmašťovácí lázni a prodloužením doby odmašťování. U leptání je důležité povrch nespálit a leptat v rozmezí 30 sekund až 2 minuty. Kalené díly mají mít před chromováním nižší tvrdost než díly, kterým před chromováním nepředchází kalení. [17]

Povlak se může loupat i po jednotlivých vrstvách při broušení, takovou vadu způsobuje kolísání proudu při pokovování nebo výrazné snížení teploty lázně. Je tedy důležité kontrolovat stálost teploty i proudu u lázně, aby se podobným vadám předcházelo. [17]

Dojde-li k vylamování hran u dílu, byla během pokovení příliš velká hustota proudu u krajů dílu, z tohoto důvodu se u dílů, které jdou na chromování, hrany sráží, případně pokud není sražení možné, používají se clony, které proudovou hustotu snižují. [17]

1.3.2. Vady struktury a barvy povlaku

Je-li povlak měkký a má mléčnou barvu, byla nejspíše teplota lázně příliš vysoká (nad 55 °C) nebo hustota proudu příliš nízká. Pokud má povlak tmavošedou barvu a je málo tvrdý, byla naopak teplota lázně nízká nebo hustota proudu vysoká. Je tedy potřeba udržovat teplotu co nejvíce stálou a nepřekračovat doporučené meze, stejně jako proudovou hustotu. [17]

Mléčně šedý povlak s hrubým povrchem vzniká při vysoké teplotě a nízké proudové hustotě lázně. Tuto vadu může ale také způsobit pokles obsahu kovu v lázni, případně znečištění lázně železem nebo nízký obsah kyseliny sírové. Předcházet této vadě lze regulací podmínek v lázni a kontrolou obsahů složek lázně. [17]

Póry v povlaku mohou vznikat kvůli pórovitosti základního materiálu, nebo při špatném zavěšení dílu ponořeného do lázně, kdy bylo částečně nebo úplně zamezeno unikání vodíku z materiálu. Pro prevenci před pórovitostí je potřeba základní materiál brousit a dbát na vhodný výběr závěsu dílu, který nebrání unikání vodíku (např. rotační). [17]

Pokud má povlak šedočernou barvu s duhovými skvrnami, byl v lázni buď malý obsah kyseliny sírové, nebo nebyl základní materiál pro chromování vhodný. Je tedy potřeba kontrolovat obsah H2S04 a volit vhodné materiály. [17]

Hrubé až pískovité chromové povlaky, které jsou jen obtížně leštitelné, vznikají při vysoké teplotě ku nízké hustotě elektrického proudu a naopak. Stejná vada vzniká i při nízkém obsahu kyselin (kyseliny chromové a sírové). Vliv může mít i vysoký obsah nečistot v lázni (cizích kovů např. zinku), nebo vysoký obsah trojmocného chromu. Kromě podmínek v lázni může tuto vadu způsobovat i hrubý a porézní povrch základního materiálu. Aby se této vadě předcházelo, je potřeba regulovat podmínky v lázni, ředit lázeň nebo naopak doplňovat suroviny, kterých je nedostatek. Vstupní materiál je potřeba ošetřovat předběžnou úpravou. Pro správný průběh elektrolýzy je vhodné používat kvalitnější anody. [17]

Za nárůsty na povrchu materiálu stojí velká hustota proudu, nízká teplota lázně, kal v lázni vznikající rozpouštěním nevhodných anod, nebo případné rýhy na povrchu základního materiálu. Nárůstům lze zamezit zmenšením proudové hustoty, zvýšením teploty lázně, usazením kalu a broušením nebo leštěním základního materiálu. [17]

Při neodborném vytvrzování se mohou vytvářet na povrchu grafitové shluky nebo póry, které způsobují prohlubně a díry v chromovém povlaku. Stejnou vadu mohou způsobovat i nahromaděné bubliny vodíku, které nejsou při elektrolýze dostatečně odváděny. Z toho důvodu je tedy důležité dbát na kvalitu vytvrzování a díly nesmí být zavěšeny tak, aby byly velké plochy v horizontální poloze. Kumulaci vodíkových bublin lze také zamezit pohybem dílů při pokovování. [17]

Přítomnost matných skvrn na povrchu mohl způsobit nesprávně očištěný podkladový materiál, lokální spálení mezivrstvy vznikající při tepelném ovlivnění během nedostatečně chlazeného broušení, nebo vysoký obsah kyseliny sírové. Díly je potřeba tedy důkladně očistit. Pro leštění mezivrstvy je možné použít vídeňské vápno a na základě rozboru lázně lze vysrážet přebytečnou kyselinu sírovou uhličitanem barnatým. [17]

1.3.3. Závady s ohledem na provoz lázně

Dojde-li k zeslabení povlaku v horní části dílu, byl díl ponořen v malé hloubce. Horní hranu je potřeba ponořit alespoň 10 cm pod hladinu lázně, aby byla zajištěna rovnoměrná vrstva na celém dílu. Pokud je zeslabení patrné lokálně po celém kuse, došlo nejspíše k nepravidelnému vylučování povlakového kovu způsobené pokrytím anod izolační vrstvou. K nepravidelné vrstvě může také přispívat špatné rozmístění okolních dílů, které vyvolávají stínící účinek. Katody je potřeba v případě izolačních nárůstů překartáčovat a dbát na vhodné rozmístění dílů. [17]

Pokud se liší povlak z horní a spodní strany, kde zvrchu má povrch lesklý a zespodu povrch hrubý, byl díl nejspíše příliš blízko dna lázně. Rozvířený kal u dna lázně má za následek hrubý povrch dílce. Aby se této vadě předcházelo, neměl by být dolní kraj dílce blíže než 15 cm ode dna lázně. [17]

Kolísá-li proud při pokovení nebo roste napětí lázně, jsou nejspíše anody pokryté izolační vrstvou a je potřeba anody vykartáčovat a následně zkontrolovat průchodnost proudu. [17]

Pomalé vylučování chromu, kdy není dosaženo předpokládané tloušťky vrstvy, mohlo být způsobeno vysokou teplotou lázně, špatně stanovenou proudovou hustotou, vysokou koncentrací lázně nebo špatným dosedem závěsů. Jako nápravná opatření je potřeba regulovat teplotu, proud a koncentraci lázně, případně zkontrolovat uchycení závěsů. [17]

Jestliže se povlak vylučuje pouze na rozích a hranách kusu, byl nadměrný obsah kyseliny sírové v lázni nebo malá hustota elektrického proudu. Je tedy potřeba zkontrolovat lázeň, nebo zvýšit proudovou hustotu. [17]

Pokud se chromový povlak nevylučuje vůbec, byl v lázni nedostatek kyseliny sírové, nebyl očištěný povrch (oxidy a mastnota), nebo byl použit nevhodný materiál. Podle rozboru lázně je pak potřeba přidat H2SO4, zkontrolovat správné odmaštění nebo zvážit vhodnost materiálu. [17]

Nepravidelné vylučování povlaku způsobují vrstvy oxidů, okují a zbytků vytvrzovacích solí na povrchu, které na něm zůstaly po nedostatečném odmaštění/očištění povrchu. Za nepravidelným vyloučením může stát i shlukování vodíkových bublin nebo velké obsahy chromitých a železitých sloučenin, ale také přílišná tvarová složitost součásti nebo malá nárazová proudová hustota. Jako prevence je tedy potřeba povrch dokonale odmastit, odmořit a u zavěšení umožnit únik vodíkových bublin. Kvůli vhodnému složení je potřeba lázeň regenerovat, zředit, nebo doplnit o potřebné chemikálie. Pomoci může také zvýšení nárazové proudové hustoty po zavěšení součásti. [17]

Nevylučující se chrom okolo vrtaných a uprostřed velkých ploch způsobuje intenzivní proudění vodíku, kterému lze zamezit použitím ucpávek do otvorů, případně fólií na velkých plochách. [17]

1.4. Alternativy pro tvrdochrom

Konvenční způsob tvrdého chromování přináší kromě řady výhod také nevýhody. Nespornou výhodu v podobě poměrně nízkých pořizovacích nákladů zařízení zcela zásadně zastiňuje převaha nevýhod. Nízká proudová efektivita, nízká odolnost proti sírovým kyselinám či chloridům a taková zbytková pnutí, která snižují únavovou pevnost a korozní odolnost byly důvody, proč se začala hledat alternativní technologie, která by tyto nevýhody omezila či zcela eliminovala. Kromě zmíněných nevýhod je tu ještě jedna, která je zcela zásadní pro současnou společnost, neekologičnost procesu. [18]

1.4.1. Kompozitní tvrdé chromování

Jde o speciálními typy povlaků tvrdého chromování (vyvinuté firmou Goetze). Jsou to povlaky, které jsou tvořeny tvrdochromovou matricí, ve které jsou obsaženy velice tvrdé částice. Nejčastěji se používají částice keramické nebo diamantové. [19]

Tyto kompozitní povlaky se nazývají CKS resp. GDC (Goetze Diamond Coating). CKS povlak obsahuje v matrici tvrdé částečky oxidu hlinitého Al2O3 o velikosti 0,5 až 5 µm. Obsah těchto částeček v povlaku se pohybuje mezi 2 až 12 %. GDC povlak má v chromové matrici obsaženy místo částeček oxidu hlinitého tvrdé částečky diamantu (C) o velikosti 0,1 až 2 µm. Jejich obsah se v povlaku pohybuje v rozmezí 0,5 až 2 %. V obou případech tvrdé částečky oxidu hlinitého nebo diamantu vyplňují síť mikrotrhlinek, ve které jsou zakotveny po celém povrchu. Zatímco u technologie CKS jsou tyto mikrotrhliny přes celou tloušťku povlaku, u GDC povlaků jsou mikrotrhliny jen do určité hloubky. Díky extrémně vysoké tvrdosti oxidu hlinitého a diamantu dosahují tyto povlaky tvrdosti 900 až 1200 HV a vysoké odolnosti proti opotřebení. [19]

1.4.2. HEEF 25

HEEF 25 je inovativní proces funkčního chromování, ve které se používají pouze síranové a organické katalyzátory, dosahující vysokého katodového proudového výtěžku bez obsahu fluoridů. Při regulaci parametrů vylučování chromu a koncentraci lázně, lze technologii aplikovat na běžné funkční chromování i speciální metody jako dvouvrstvé funkční chromování, nebo pro chromování hlubotiskových válců. [20]

Použití vícevrstvého chromování zvyšuje poskytovanou korozní odolnost úpravy. Velkou výhodou je univerzálnost procesu, kde na samotný průběh postačí běžné strojní zařízení pro funkční chromování, protože tato technologie nemá žádné speciální požadavky. [20]

Přednosti procesu HEEF 25 oproti konvenčním lázním:

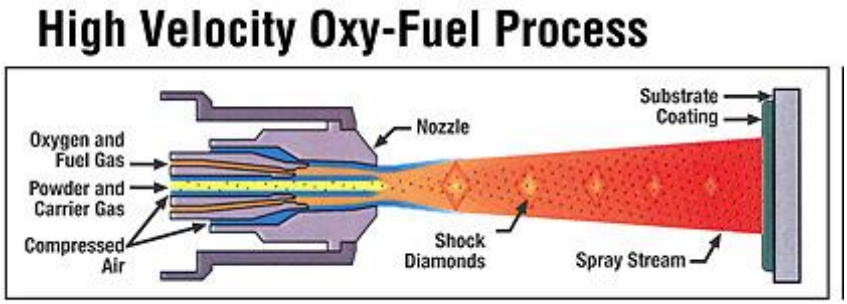
- Vysoký katodový proudový výtěžek (23–28 %), při kterém se doba vyloučení mikronu chromové vrstvy dostává na polovinu běžných lázní (40-130h),
- úspora nákladů na elektrickou energii o cca 45 % oproti běžným síranovým lázním,
- vyloučený chromový povlak je mikrotrhlinkový, kde se v závislosti na použité technologii počet mikrotrhlinek pohybuje v rozmezí 300–800 na lineární centimetr,
- vyloučený povlak je lesklý a dosahuje tvrdosti cca 1 000 HV0,1,
- vyloučený povlak má vysokou odolnost proti opotřebení a otěru,
- lázeň se dobře rozptyluje a rozdělení kovu je díky tomu rovnoměrné,
- leptací účinky oceli jsou porovnatelné s konvenčními elektrolyty,
- všechny komponenty lázně jsou zcela rozpustné i při pokojové teplotě, což usnadňuje běžné čistící a regenerační procesy. [20]

Oproti fluoridovým lázním nemá lázeň HEEF žádné nevýhody. Vůči konvenčním lázním mají konečné produkty pouze horší možnosti opracování povlaku. [20]

1.4.3. Žárové nástřiky HVOF

Technologie žárových nástřiků spočívá v principu, při kterém je nanášený materiál ve formě prášku (případně drátu) natavován zdrojem tepla (el. oblouk, plamen, plazma), kde jsou natavené částice urychlovány směrem k povlakované součásti. Při kontaktu natavené částice s povrchem dojde k jejímu rozprostření společně se zakotvením a rychlým ztuhnutím. Tímto způsobem se na základním materiálu utváří povlak lamelární struktury, který je pro žárové nástřiky charakteristický. Konkrétně jako alternativa pro funkční chromování je z technologií žárových nástřiků nejvhodnější technologie HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Touto technologií je možné na široké spektrum základních materiálů vytvářet povlaky na bázi kovů, jejich slitin, superslitin, polymerů, cermetů a keramik. [8]

Mezi hlavní přednosti HVOF patří nízký obsah oxidů v povlaku a to pod 1% i při nástřiku reaktivních kovů. Samotná struktura žárově stříkaného povlaku dosahuje velmi nízké pórovitosti struktury též pod 1% a vzniklá vrstva dosahuje přilnavosti vrstvy větší než 80MPa. Nejnovější hořáky 3. generace pro HVOF nástřik (např. JetKote II, DJ 2600, DJ 2700, TAFA JP 5000) umožňují při optimální volbě depozičních parametrů vytvářet povlaky v tlakovém pnutí, které dosahují velice dobrých únavových vlastností. Současně třetí generace hořáků umožňuje nanášet povlak o tloušťkách až několik mm. Nespornou výhodou HVOF povlaků oproti tvrdému chromování je podstatně pestřejší možnost materiálové volby, která může být téměř libovolně navolena pro konkrétní požadavky dané aplikace. Jako nejvhodnější náhrada tvrdého chromování se ukázal povlak WC-Co, který svými vlastnostmi nejlépe pokrývá spektrum aplikací tvrdého chromování. [8]



Obrázek 9 - Schéma technologie HVOF [Eastern Metallizing Co Private Limited]

Výhody povlaků HVOF oproti tvrdému chromování:

- Široké spektrum materiálové volby,
- nezávislost na základním materiálu díky mechanickému zakotvení stříkaných povlaků,
- lepší únavové a korozní vlastnosti, lepší otěruvzdornost
- zvýšená hustota povlaky bez sítě povrchových trhlin,
- rychlejší průběh depozice,
- lepší životnost,
- absence tepelného zpracování proti vodíkové křehkosti,
- teoreticky neomezená velikost součástí,

- rovnoměrná vrstva povlaku,
- ekologičtější proces,
- obecně čistější a bezpečnější provoz,
- bezproblémová údržba a čištění lázní,
- nepoužívají se toxické látky,
- vznikající odpad ve formě prostřiku lze recyklovat nebo jinak použít. [8]

Alternativa pro tvrdé chromování ve formě žárového nástřiku je ve světě aktuální téma, které je intenzivně studované. Celá řada probíhajících projektů a publikací zabývajících se touto problematikou je toho důkazem. Kvůli silnému konkurenčnímu prostředí je ale obtížné o této problematice získat podrobnější informace. Nejrozšířenější je tato myšlenka o nahrazení konvenčního chromování především v leteckém průmyslu, kde se společnosti jako Boeing, Delta Airlines, Lufthansa a Rolls Royce zabývají náhradou tvrdého chromování pro součásti letadel. Další oblastí, kde je tato možnost v kurzu je energetika, konkrétně společnost General Electric ve spolupráci s Pratt and Whitney řeší problematiku náhrady tvrdého chromování pro součásti plynových turbín. Ve Spojených státech vznikla pro tuto problematiku dokonce organizace HCAT (Hard Chromium Alternative Team), která se zabývá touto problematikou společně s kanadskými společnostmi. Tento výzkum sponzorují národní ministerstva obrany a je zaměřen především na zbrojní a letecký průmysl. U všech výše zmíněných projektů se jedná výhradně o technologii HVOF. [8]

1.4.4. Technologie řízené nitridace v ionizované kapalině (CLIN)

Jedná se o technologii nitridace, která probíhá v ionizované kapalině a poskytuje povrchu odolnost proti opotřebení, zadírání, únavě materiálu a deformaci. U technologie CLIN se pro proces nitridace využívá stejný regenerátor a plnící sůl jako pro karbonitridaci a pasivační soli, které nad bodem tání postupně přecházejí do kapalné fáze. Tyto soli neobsahují žádný jedovatý kyanid a představují tak podstatně menší riziko. Jsou složeny z alkalických minerálních solí, konkrétně z uhličitanů a kyanatanů, které nepředstavují žádné ekologické ohrožení, takže se na jejich použití nevztahuje omezení v souvislosti s nařízením REACH nebo SEVESO z Evropské unie. [21]

Při procesu řízené nitridace technologií CLIN dochází k reakci mezi roztavenou solí a základním materiálem. *„Vzniká heterogenní povrchová reakce, při které se převádí uhlík a dusík obsažený v solné tavenině do základní kovové slitiny“*. Po difuzi dusíku do oceli dojde na povrchu základního materiálu ke vzniku dvou rozpoznatelných fází:

1) Sloučeninová vrstva s porézním povrchem (v literatuře uváděná také jako spojovací, případně "bílá vrstva"), která je tvořena vrstvou nitridů železa (nazývaných Ɛ-epsilon typ, nebo γ-gamma fáze) a nitridů legujících prvků.

2) Difuzní vrstva, která se nachází pod vrstvou sloučeninovou, ve které je mezi atomy železa a legujících prvků přítomen dusík v pevné formě. [21]

Tloušťku sloučeninové a difuzní vrstvy ovlivňuje použitý základní materiál a dílčí parametry technologie CLIN. Obecně lze tvrdit, že se tloušťka sloučeninové vrstvy řádově pohybuje v rozmezí jednotek až desítek mikrometrů (0-30 μm). Difuzní vrstva pak dosahuje tloušťky až několik desetin milimetru. [21]

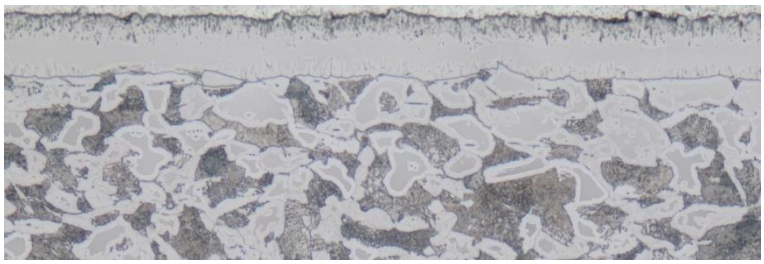
Aby bylo kromě uvedených vlastností dosaženo vysoké korozní odolnosti, musí po nitridaci následovat pasivační stupeň, který spočívá ve zpracování v oxidační lázni, kde se na povrchu porézní zóny vytvoří vrstva skládající se ze směsných oxidů železa Fe3O4 a organické antikorozní impregnace. Při impregnaci dojde k vyplnění pórů a výrobek získává na dotek suchý černý povrch. [21]

V závislosti na složitosti dílů může korozní odolnost u jednoduchých dílů přesáhnout 700 hodin v solné komoře a u složitějších dílců odolává povrchová vrstva až po 400 hodinách působení agresivního prostředí. Technologie CLIN se místo tvrdochromu používá například u plynových pístních tyčí, hydraulických válců, motorových ventilů apod. Konkrétně se jako alternativa pro funkční chromování nejvíce využívá technologie ARCOR DT, která probíhá při nejnižších teplotách. [21]

Varianty technologie CLIN:

- **ARCOR V**

Jedná se o proces feritické karbonitridace, jehož teplota zpracování se pohybuje v rozmezí 500 až 590 °C, kde je výše teploty závislá na druhu zpracovávané oceli a požadovaných vlastnostech. Tato varianta poskytuje velmi dobrou otěruvzdornost, výbornou korozní odolnost a velmi dobré třecí vlastnosti. V případě režimu mazání a kontaktu s ocelovým protikusem se koeficient tření pohybuje kolem hodnoty 0,1 při zatížení do 400 N. Tato povrchová vrstva dosahuje podobných charakteristik jako vrstva tvrdochromu a proto se používá jako jeho alternativa. [21]



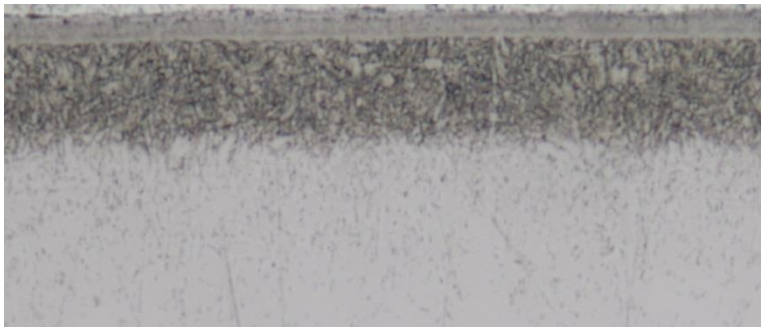
Obrázek 10 - Struktura vrstvy ARCOR V [21]

- **ARCOR N**

Tato možnost nabízí podstatnou technickou výhodu pro namáhané mechanické dílce (tlumiče, hydraulické válce atd.). Jde o proces austenitické nitrocementace s teplotou zpracování okolo 630 °C, při které se kombinuje velmi houževnatá austenitová vrstva nitridů s vrchní sloučeninovou vrstvou. Kombinace těchto dvou vrstev nabízí dobrou odolnost proti praskání u mechanicky namáhaných dílů. [21]

- **ARCOR DT**

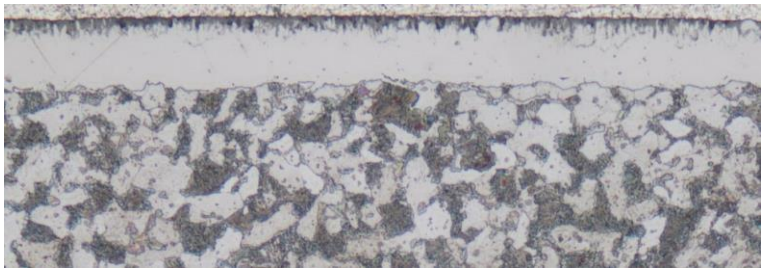
U této varianty se teplota zpracování pohybuje v rozmezí od 490 do 530 °C, patří tedy mezi nejnižší a tento typ technologie CLIN byl vyvinut pro nízkoteplotní nitridaci motorových ventilů. Díky nízké teplotě je možné před nitridací provést indukčním kalení dříku u ventilů vyrobených z austenitické nebo martenzitické oceli, případně niklové slitiny. Tato metoda poskytuje vysoký nitridační potenciál a použitá iontová kapalina má ideální viskozitu pro nízké teploty. Tato varianta patří mezi ty novější a je z technického i ekonomického hlediska ideální náhradou tvrdochromu např. u zmíněných motorových ventilů. [21]



Obrázek 11 - Struktura vrstvy ARCOR DT [21]

- **ARCOR L**

Tento typ byl vyvinut speciálně pro aplikace, kde je žádoucí dodržení nízké povrchové drsnosti. U této varianty je možné dodržet povrchovou drsnost v řádu Ra 0,4 bez nutnosti následujícího mechanického zpracování. Jedná se o karbonitridaci ve feritické oblasti, u které se teplota zpracování pohybuje od 530 do 590 °C, v závislosti na použité oceli a požadovaných vlastnostech. ARCOR L poskytuje i přes nízkou porozitu povrchu výbornou korozní odolnost, která se pohybuje v řádu 300 hodin v solné komoře u konstrukčně jednodušších dílů. [21]



Obrázek 12 - Struktura vrstvy ARCOR L [21]

- **ARCOR CS**

Je variantou, která dosahuje nejvyšší korozní odolnosti. Jedná se o feritickou karbonitridaci, která probíhá v rozmezí teplot 500 až 590 °C v závislosti na druhu oceli nebo požadovaných vlastnostech. Tento proces poskytuje vysokou otěruvzdornost a především vynikající korozní odolnost, která může na konstrukčně jednoduchých dílcích přesáhnout až 1000 hodin v solné komoře. [21]

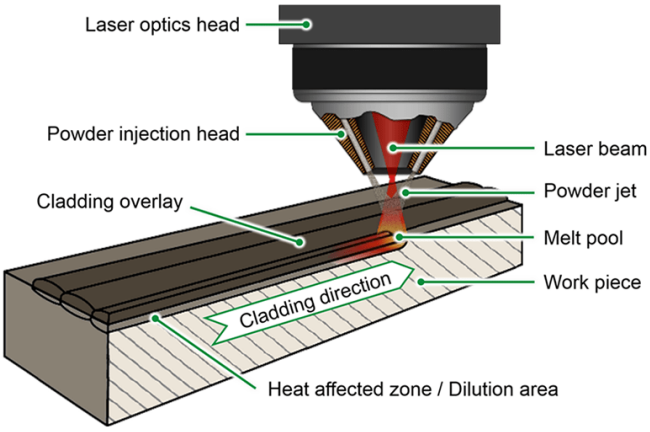
Pomocí regulace technologických parametrů lze dosáhnout širokého spektra mechanických charakteristik, korozní odolnosti i tribologických vlastností. Mezi hlavní výhody povrchové úpravy CLIN patří velmi dobré třecí vlastnosti, kde efektu mazání napomáhá pórovitý povrch podobně jako u tvrdochromu. Ze třecích vlastností vyplývá i dobrá odolnost proti otěru. Díky keramickým vlastnostem vrstvy nitridů vykazuje povrch i vynikající odolnost proti zadření, kde adhezi mezi dvěma povrchy brání nitridy na povrchu. Nitridová vrstva je integrovaná do základního materiálu a má výbornou povrchovou odolnost proti mechanickým i korozním vlivům. [21]

Ve srovnání s tvrdochromem dosahuje v agresivním prostředí CLIN lepší korozní odolnost, nehrozí u něj vodíková křehkost a díky spojitosti povrchové vrstvy se základním materiálem nedochází k narušování jejich vzájemné adheze. Vrstva je porózní pouze ve své povrchové části zvané sloučeninová vrstva. Díky této skutečnosti nemůže na rozdíl od tvrdochromu docházet k trhlinám procházejícím až k základnímu materiálu. Velká výhoda je také absence dokončovacích operací, které nejsou u CLIN technologie potřeba a optický vzhled má elegantní černou barvu, která vzbuzuje suchý pocit na dotek. V neposlední řadě je také velkou výhodou ekologická stránka celé technologie. [21]

Iontová nitridace v kapalině má značné výhody i oproti nitridaci v plynu, protože technologie CLIN probíhá rychleji, rovnoměrněji, má lepší reprodukovatelnost, nižší nároky na čistotu povrchu před provedením povrchové úpravy a dosahuje lepších mechanických, tribologických a korozivzdorných vlastností. [21]

1.4.5. Laser Cladding

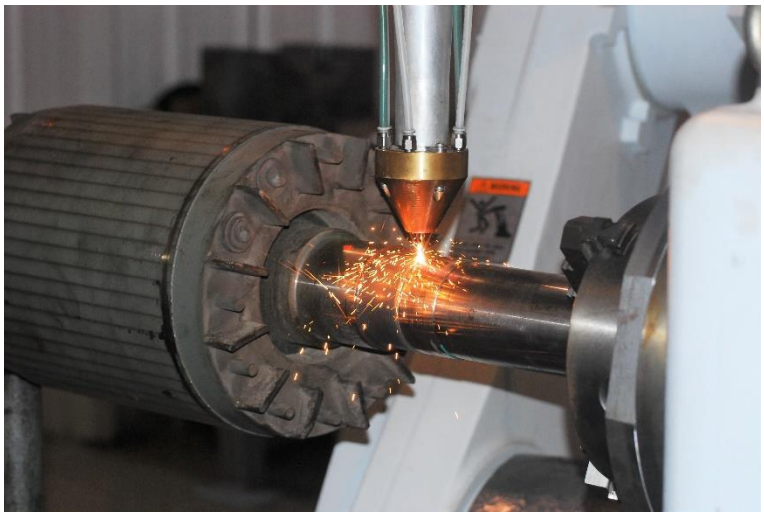
Laser Cladding je inovativní technologie laserového navařování, která disponuje velmi malou oblastí tepelného ovlivnění základního materiálu a řadí se mezi nejpreciznější způsoby navařování. Návary vyhotovené touto technologií chladnou téměř okamžitě a mají velký potenciál do budoucnosti. Laserový návar vzniká v důsledku natavení základního materiálu působením laserového svazku, kde se do místa natavení přivádí přídavný materiál. Velmi malá zóna tepelného ovlivnění umožňuje navařovat laserem velmi drobné součásti a jemné detaily, aniž by došlo k jejich deformaci nebo poškození. [22]



Obrázek 13 - Schéma technologie Laserového navařování [Laser Cladding Technologies]

Pro průběh procesu laserového navařování je nezbytné zajistit potřebnou hustotu energie svazku, která se liší v závislosti na typu použitého laseru. Dále je pro proces také důležité stanovit čas, po který bude probíhat interakce mezi materiálem a laserovým paprskem. [23], [24]

Pro aplikaci laserového navařování je podstatné uvažovat i odrazivé vlastnosti základního materiálu. Z tohoto důvodu je potřeba zohledňovat typ kovu, stav jeho povrchu a regulovat vlnovou délku laserového svazku. Odrazivost laserového paprsku ovlivňuje i teplota dílu, na který se provádí návar. Se zvyšující se teplotou dílu roste v zóně návaru pohltivost materiálu, která zvyšuje potenciál materiálu absorbovat více tepla. [23], [24]



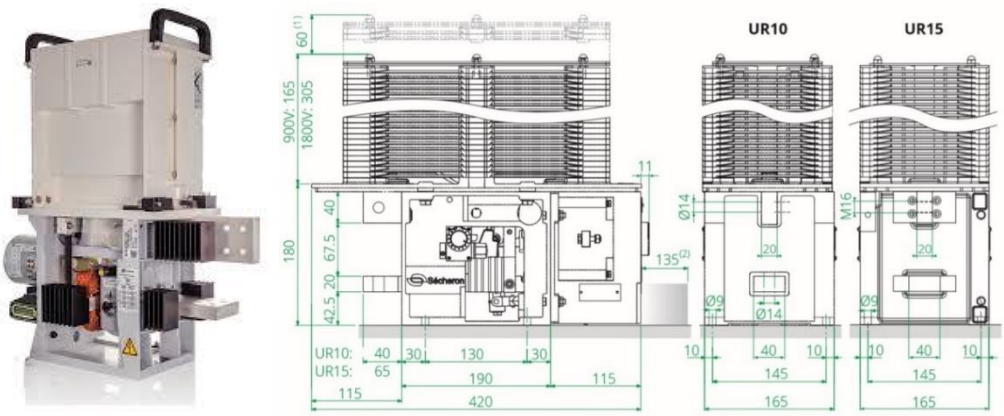
Obrázek 14 - Proces laserového navařování [Synergy Additive Manufacturing, LLC]

Na svařování se hojně používaly CO2 lasery především pro své vyšší absolutní výkony. Mají ale nevýhodu, že je v oblasti vlnové délky CO2 laserů (10,6 µm) absorpce většiny konstrukčních materiálů nízká. Nízká absorpce snižuje účinnost, která je oproti pevnovláknovým laserům s vlnovou délkou 1,06 µm o řád nižší. Z tohoto důvodu se pro navařování nejvíce používají účinnější pevnovláknové lasery jako jsou Nd:YAG lasery a v této technologii nejvíce využívaný HPDD lasery, které jsou navíc díky možnosti vedení paprsku optickými vlákny konstrukčně jednodušší oproti soustavě zrcadel u CO2 laserů. [23], [24]

2. Praktická část

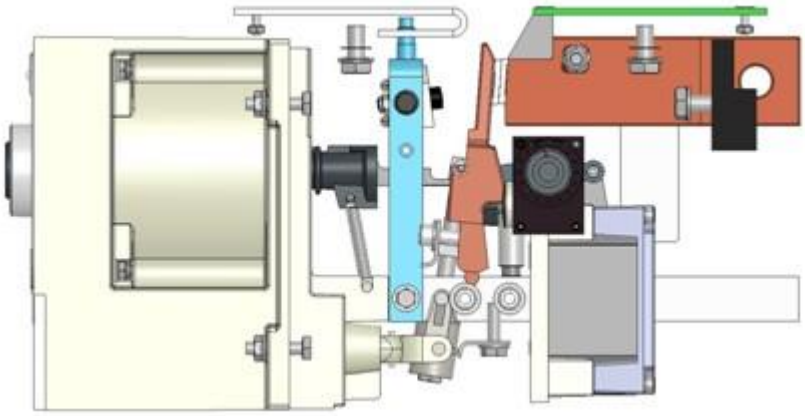
2.1. Funkce dílu

Jedná se o jádro vyráběné firmou Sécheron Hasler CZ spol. s r.o, které je komponentem DC vysokonapěťového rychlovypínače, který se používá pro kolejová vozidla jako jsou metra, lehká kolejová vozidla (LRV), tramvaje, EMU a vlaky na stejnosměrný proud včetně vysokorychlostních vlaků.



Obrázek 15 - Rychlovypínač typu UR [Sécheron Hasler CZ spol. s r.o.]

Jádro je spojené s kontaktem hřídelkou, která prochází vnitřním průměrem a svým posuvem v pouzdře obaleném cívkou spíná kontakt ve vysokonapěťovém vypínači. Jádro svým kmitavým pohybem brání vzniku oblouku a je proto naprosto zásadní jeho nízká povrchová drsnost. Součástí sestavy jsou díly, které se během životnosti sestavy několikrát vymění, například spínače s pájenými stříbrnými kontakty, které se po určité době spálí a je nutné je vyměnit za jiné. Jádro by mělo vydržet po celou životnost sestavy, proto je důležitá jeho kvalitní povrchová úprava zajišťující dobrou otěruvzdornost a korozivzdornost.



Obrázek 16 - Schéma podsestavy rychlovypínače typu UR [Sécheron Hasler CZ spol. s r.o.]

2.2. Vstupní polotovar

Hutním polotovarem je kruhová, za studena tažená tyč z automatové oceli 11109.0 ČSN 426510.12 (W. Nr. 1.0715) o průměru 32 mm s úchylkou h12. Automatové oceli jsou zvláštní kategorií nízkouhlíkových ocelí určených k dosažení velmi dobré obrobitelnosti na více vřetenových soustružnických automatech, kde umožňují využívat vysoké řezné rychlosti. [3]

Tabulka 1 - Chemické složení oceli 11 109

Chemické složení (%hm.)					
C	Max. Si	Mn	Max. P	S	Pb
≤ 0,14	0,05	0,90 - 1,30	0,11	0,27 - 0,33	

Legující prvky jako fosfor, síra a olovo zlepšují obrobitelnost. Naopak křemík, který při dezoxidaci tvoří oxid křemičitý, obrobitelnost snižuje, proto je důležité kontrolovat jeho maximální obsah v materiálu. [3]

Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti oceli 11 109

Mechanické vlastnosti					
Tloušťka	Válcovaná a loupaná (+SH)		Tažená za studena (+C)		
mm	HB Tvrdost	Rm MPa	Rp0,2 Mpa	Rm Mpa	A5 % min.
16 < d ≤ 40	112 - 169	380 - 570	375	460 -710	8

2.3. Výrobní postup

2.3.1. Dělení materiálu

Kruhová tyč je dodávána ve standardní délce 3 m. Jako první je tedy potřeba tyč nařezat na metrové kusy, kvůli omezeným rozměrům podavače u soustruhu MORI SEIKI NL1500.

2.3.2. Soustružení

Nařezané metrové přířezy se zakládají do podavače a jsou soustruženy načisto soustruhem MORI SEIKI NL1500. Vnější průměr jádra s požadavkem na drsnost povrchu N5 (Ra 0,4) viz náhled výkresu v příloze A, je superfinišován soustružením pomocí výměnné břitové destičky s hladící geometrií.

Požadavek na drsnost povrchu Ra 0,4 má opodstatnění vzhledem k aplikaci dílu a je přísně sledován jak obsluhou stroje, tak mezioperační kontrolou.

2.3.3. Povrchová úprava tvrdochrom

Předúpravou povrchu je elektrolytické odmaštění povrchu jádra v galvanické lázni. Následně je povrch tvrdě chromován o tloušťce vrstvy 10 ÷ 20 µm, funkčně chromován je pouze vnější povrch, který je na výkrese v příloze A označený čerchovanou čarou.

Samotné nanesení povlaku tvrdého chromu je provedeno v kooperaci galvanickým vyloučením podle normy ČSN EN ISO 6158 - Fe/Cr10-500hr.

Obrázek 17 - Chromovací lázeň [MZ-chrom, s.r.o.]

Pro nanesení funkčního chromu je použita chromovací lázeň pro tvrdé povlaky na obrázku výše s následujícími parametry

Složení elektolytu:

- 250 g/l oxidu chromového
- Katalyzátorem je koncentrovaná kyselina sírová 10 g/l

Podmínky lázně

- Pracovní teplota lázně je cca 50 °C,
- Proudová hustota je 50 A/dm2.

V kooperaci je dále v chemické lázni ve směsi soli při 140 °C černěn vnitřní nechromovaný průměr jádra.

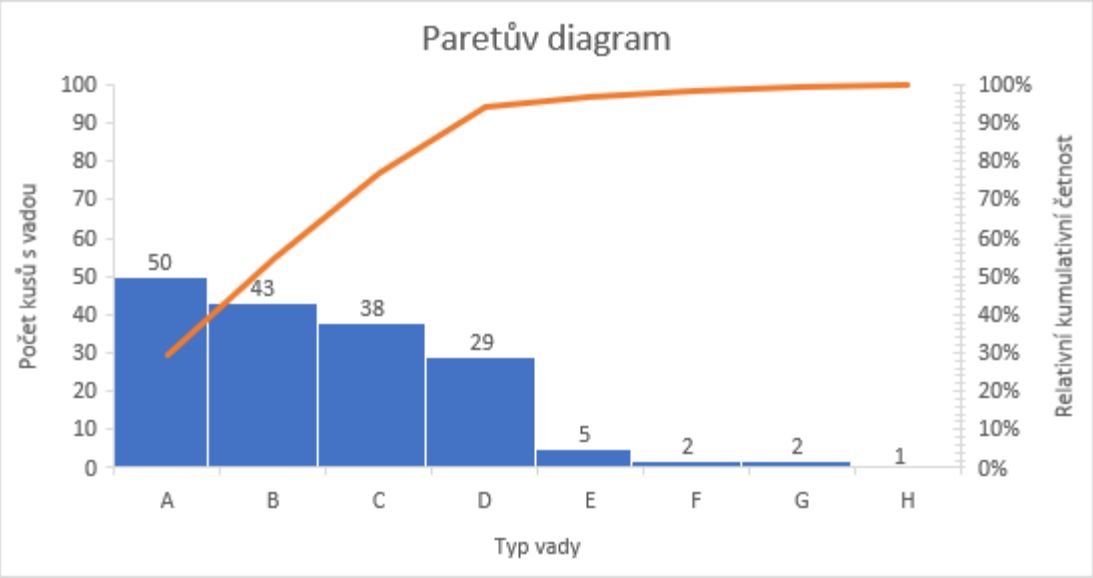
2.4. Analýza vad z výrobního procesu

Pro stanovení nejpravděpodobnějších příčin, kvůli kterým k nekvalitě došlo, tedy příčin, které je potřeba z výrobního procesu odstranit, byla zvolena Paretova metoda 80%. Aby byla statistika nekvality co nejpřesnější, nebyly pro vytvoření Paretovy analýzy vybrány náhodné kusy z dávky, ale rovnou dávka celá. Typy jednotlivých vad a jejich četnost výskytu je uvedena v tabulce č. 3 níže.

Tabulka 3 - Přehled vad a četnost jejich výskytu

Vada	Označení	Počet kusů	Relativní kumulativní četnost (%)
Nedodržená drsnost	A	50	29,41
Vizuální nekvalita	B	43	54,71
Pórovitost	C	38	77,06
Nárůstky na hranách	D	29	94,12
Nedodržená tvrdost	E	5	97,06
Mechanické poškození	F	2	98,24
Nedodržená tloušťka vrstvy	G	2	99,41
Jiné vady	H	1	100,00

Graf 1 - Paretův diagram četnosti vad



Jako kritické vady, které je z výrobního procesu potřeba odstranit, tedy jinými slovy 20% příčin, které mají na svědomí 80% důsledků, byly shledány vady:

- A - nedodržená drsnost,
- B - vizuální nekvalita (která úzce souvisí s výrazným nárůstem drsnosti),
- C - pórovitost
- D - nárůstky na hranách.

Na základě těchto zjištění, je v kapitole 2.5 sepsána teorie, která by měla nekvalitu objasnit. V kapitole nápravných opatření je pak popsáno, jakými metodami dojde k zamezení vzniku kritických vad během výrobního procesu.

2.4.1. Kontrola drsnosti před povrchovou úpravou

Problematika drsnosti povrchu byla sledována z dlouhodobého hlediska. Ze záznamů měření drsnosti vedených mezioperační kontrolou byla povrchová drsnost průběžných kusů brána dlouhodobě jako vyhovující. V případě nedodržení povrchové drsnosti u průběžného kusu odevzdaného kontrole, byl tento nesoulad s požadavkem ve výkresu (viz příloha A) řešen výměnnou břitové destičky, případně optimalizací parametrů stroje.

Pro ověření dat mezioperační kontroly jsem z dávky náhodně vybral 20 kusů, u kterých jsem změřil povrchovou drsnost po soustružení (viz tabulka naměřených hodnot níže).

Tabulka 4 - Hodnoty měření drsnosti po soustružení

Drsnosti povrchu po obrábění diamantem			
Vzorek č.	Drsnost Ra	Vzorek č.	Drsnost Ra
1	0,111	11	0,205
2	0,118	12	0,119
3	0,116	13	0,138
4	0,125	14	0,145
5	0,201	15	0,136
6	0,119	16	0,145
7	0,127	17	0,151
8	0,127	18	0,185
9	0,131	19	0,178
10	0,135	20	0,209

2.4.2. Kontrola drsnosti po povrchové úpravě

K nesouladu drsnosti došlo až po povrchové úpravě, kde byl nesoulad drsnosti evidován cca u 30% výrobní dávky. Pro ověření tohoto tvrzení jsem u totožné dávky odebral 20 náhodných kusů, kde se hodnoty z měření drsnosti povrchu nacházejí v tabulce níže. Měření náhodně vybraných kusů potvrdilo tvrzení o nesouladu drsnosti, kde cca třetina z měřených kusů neodpovídala požadavku jakosti povrchu Ra 0,4.

Tabulka 5 - Kontrola drsnosti po povrchové úpravě

Drsnosti povrchu po tvrdochromu			
Vzorek č.	Drsnost Ra	Vzorek č.	Drsnost Ra
1	0,285	11	0,112
2	0,596	12	1,245
3	0,389	13	0,122
4	0,395	14	1,098
5	0,291	15	0,123
6	1,212	16	0,125
7	0,127	17	0,127
8	0,127	18	1,314
9	1,367	19	0,129
10	1,498	20	0,132

2.4.3. Kontrola povrchové úpravy

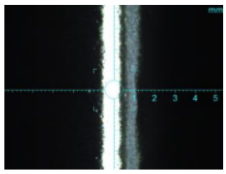
Během výrobního procesu nebylo na první pohled odhaleno žádné pochybení z naší strany, tedy během obrábění ve firmě Sécheron Hasler CZ spol. s r.o. Z tohoto důvodu následovalo ověření kvality operací, které probíhají v kooperaci mimo firmu.

V kooperaci je na vnějším plášti jádra provedena povrchová úprava funkčního chromování (tloušťka vrstvy 10 ÷ 20 µm), včetně předúpravy povrchu (elektrolytické odmaštění povrchu jádra v galvanické lázni), jak již bylo uvedeno ve výrobním postupu výše. V kooperaci je také černěn vnitřní průměr jádra.

2.4.3.1. Kontrola tloušťky vrstvy

Po návratu dávky z kooperace, je tloušťka povrchové úpravy tvrdochromu kontrolována vstupní kontrolou. Všechna měření z 8 náhodně vybraných kusů dávky byla vyhovující, tedy podmínka minimální tloušťky vrstvy 10 µm byla splněna u všech náhodně vybraných vzorků z dávky. Pro kontrolu tloušťky chromované vrstvy byl použit rentgenový přístroj Fischerscope x-ray xdl 230.

Fischerscope® **XRAY XDL-230**
Product: **2401060 / Cr/Fe** **Dir.: SECHERON**
Application: 36 / Cr/Fe

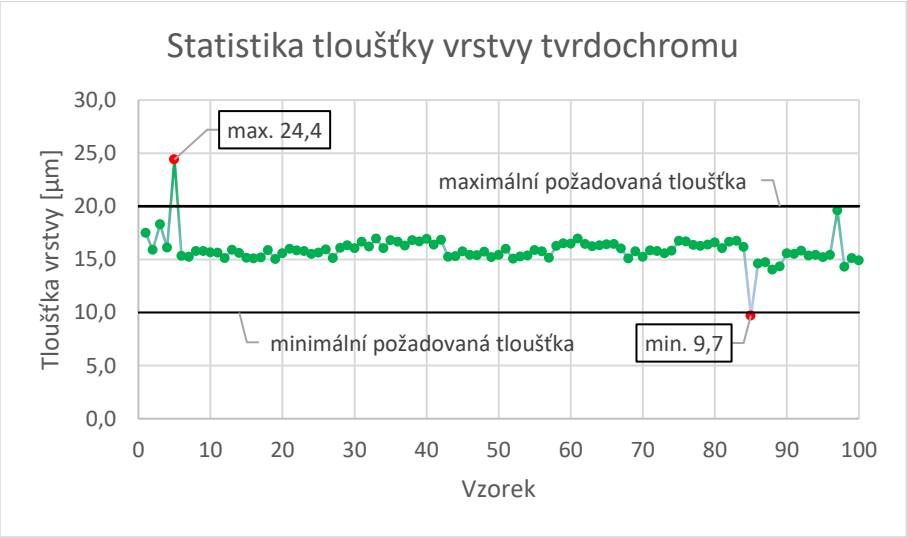


Mean	15.02	µm
Standard deviation	0.429	µm
C.O.V. (%)	2.86	
Range	1.17	µm
Number of readings	8	
Min. reading	14.5	µm
Max. reading	15.6	µm
Measuring time	5	sec

N	Cr 1 [µm] (10.0 – 100.0)
1	15.6
2	14.8
3	15.1
4	15.5
5	14.5
6	14.7
7	14.7
8	15.3

Obrázek 18 - Kontrola tloušťky chromované vrstvy

Graf 2 - Statistika kontroly tloušťky vrstvy tvrdochromu



Tloušťka vrstvy byla změřena pro celou dávku a jako nevyhovující se ukázala ve dvou případech, kdy v prvním přesáhla tloušťka vrstvy rozmezí 10 ÷ 20 µm, konkrétně 24,4 µm, což je menší problém než druhý případ, ve kterém nebyla minimální tloušťka dodržena a dosahovala hodnoty 9,7 µm.

Tyto dva výkyvy z tolerance nebyly ale shledány kritickou vadou, takže tento problém nebyl dále řešen a výsledky byly shledány jako vyhovující.

2.4.3.2. Korozní zkouška v solné mlze

Pro ověření korozivzdornosti vrstvy byla zvolena zkouška korozní odolnosti v solné mlze (NSS). Jedná se o nejstarší a stále používanou urychlenou korozní zkoušku (dle normy ČSN EN ISO 9227, ASTM B 117, ASTM G 85). Poprvé byla tato zkouška použita v roce 1914 a normována jako ASTM B117 roku 1939. Během NSS zkoušky jsou vzorky kontinuálně exponovány agresivnímu prostředí v podobě mlhy, která je tvořená neutrálním chloridem sodným o koncentraci 5 hm. % o teplotě 35 °C. [25]

Pro ověření stálosti vrstvy v korozních podmínkách byla provedena korozní zkouška v solné mlze dle ČSN EN ISO 9227 (metoda NSS) u leštěných a neleštěných vzorků, které byly nafoceny před provedením zkoušky a následně po uplynutí časových intervalů 72h, 144h a 240h (viz obrázky v příloze B).

Obrázek 19 - Leštěné chromované vzorky před zkouškou

Obrázek 20 - Leštěné chromované vzorky po 240h exponování solné mlze

Vzorky byly po exponování v korozním prostředí na základě normy ČSN EN ISO 9227 vyhodnoceny jako zkoušce vyhovující. Tento fakt ovšem nijak nenapověděl tomu, proč došlo k nedodržení povrchové jakosti a bylo nutné provést další zkoumání.

Solná mlha používaná pro zkoušku obsahuje vyšší koncentraci chloridů než mořská voda (mořská voda obsahuje kolem 3,5 hm. % rozpuštěných solí, z toho 3 hm. % NaCl). V kombinaci se zvýšenou teplotou, trvalou vlhkostí a dobrým přístupu kyslíku je korozní agresivita prostředí během NSS extrémně vysoká. Tyto uměle vyvolané podmínky významně urychlují korozní procesy a zvyšují rychlost koroze. Pro představu u běžné uhlíkové oceli dochází ke koroznímu úbytku kolem 5 µm/den (40 g m^{-2}/den). [25]

„Pro nízkou cenu, jednoduchost, rychlost a dostupnost velkého množství referenčních dat je NSS vhodná jako zkouška kvality pro výrobky a dílce z čistých kovů a slitin, kovové povlaky, konverzní vrstvy a organické povlaky na kovových substrátech.“ Nevýhodou NSS je nízká reprodukovatelnost a především obtížné převedení výsledků z nerealistickými podmínek během zkoušky na podmínky reálné při expozici atmosféře. Koncentrace chloridů během zkoušky je pro průmyslovou aplikaci dílu jen těžko představitelná. Korozní mechanismy, které při zkoušce vznikají, pak neodpovídají těm, které se dostaví v pracovních podmínkách dílu a mají tedy slabou vypovídající hodnotu, která zkresluje skutečnou korozní odolnost testovaných dílců. [25]

2.4.3.3. Zkoumání metalografických výbrusů

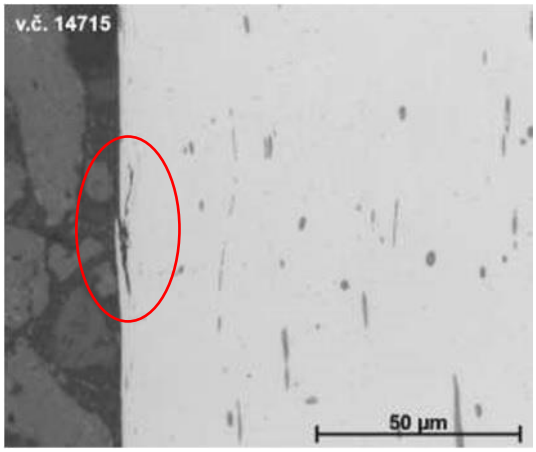
Kontrola tloušťky vrstvy povrchové úpravy a korozní zkouška v solné mlze nenapověděly, z jakých příčin došlo k nekvalitě zkoumaných jader. Proto bylo jako další krok zvoleno vyhotovení metalografických výbrusů pro analýzu jakosti dílu pod mikroskopem. K výraznému nárůstu drsnosti povrchu došlo až po povrchové úpravě chromování, proto byla pro metalografické výbrusy použita pouze jádra po povrchové úpravě.

Obrázek 21 - Pochromované jádro z automatové oceli

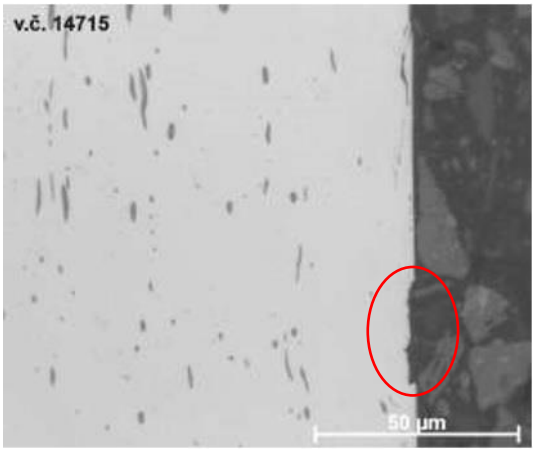
Za účelem odhalení příčin nekvality po povrchové úpravě byla provedena ve spolupráci s MÚVS v Čelákovicích analýza 2 náhodně vybraných kusů z 5 vadných ocelových jader. Cílem analýz bylo odhalit vady na vnějším povrchu ocelových jader, ke kterým došlo během výrobního procesu.

Dvě náhodně vybraná jádra pro analýzu byla podélně rozříznuta (kolmo na směr obrábění) a byly z nich odebrány vzorky. Vzorky byly označeny jako Vzorek 1 a Vzorek 2. Oba vzorky byly zkoumány v neleptaném i leptaném stavu.

Pro hodnocení metalografických výbrusů byla použita světelná mikroskopie a rastrovací elektronová mikroskopie (dále jen SEM). Vzorek 1 je zdokumentovaný na Obr. 22, 23 a 24 (zbylé snímky v příloze C) a vzorek 2 na obrázku 25 (ostatní snímky dále v příloze C).

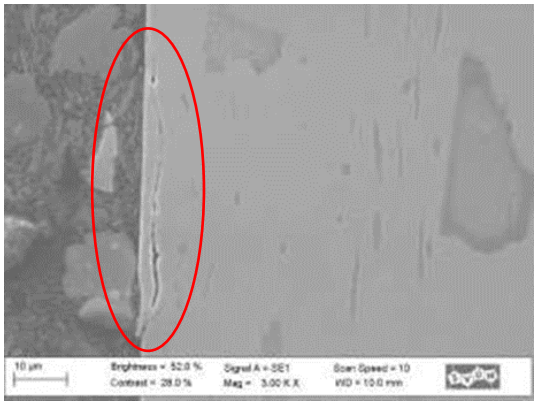


Obrázek 22 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, Světelná mikroskopie

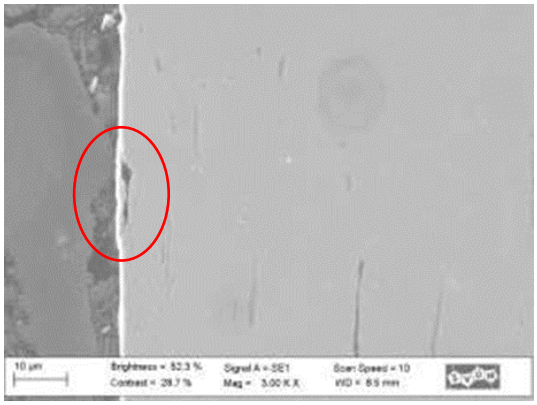


Obrázek 23 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, Světelná mikroskopie

Analýza potvrdila, že materiálem, ze kterého jsou ocelová jádra vyrobena je automatová ocel, která je specifikována v kapitole 2.2. Struktura ocelových jader byla kvalifikována jako feriticko-perlitická. Orientace sulfidů odpovídá specifikaci polotovaru, tedy sulfidy jsou protaženy ve směru tváření (polotovarem je za studena tažená tyč kruhového průřezu). Orientace odpovídá i u perlitických zrn, která jsou uspořádána do řádků ve směru tváření. Na obou dvou vzorcích byly zjištěny povrchové vady, kterými jsou přeložky a prohlubně (viz Obr. 22 a 23 výše a Obr. 24 a 25 níže).



Obrázek 24 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, SEM



Obrázek 25 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 2, SEM

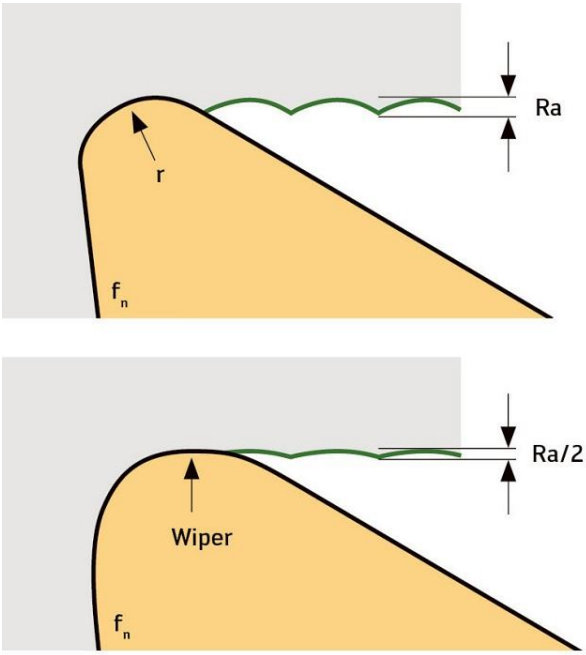
2.5. Teorie příčin nárůstu povrchové drsnosti

2.5.1. Problematika hladící geometrie VBD při soustružení

Pro oblast třískového obrábění, stejně tak jako v každém výrobním oboru, je klíčová produktivita a jakost, která významně ovlivňuje postavení výrobce na trhu. Jednou z variant, jak při zachování nebo i zvýšení jakosti povrchu navýšit i produktivitu výroby, je právě použití hladící geometrie u obráběcího nástroje. [26]

„Dosažená drsnost obrobeného povrchu vyjádřená hodnotou Ra úzce souvisí s poloměrem zaoblení špičky nástroje, úhlem špičky a úhlem nastavení hlavního ostří nástroje.“ [11]

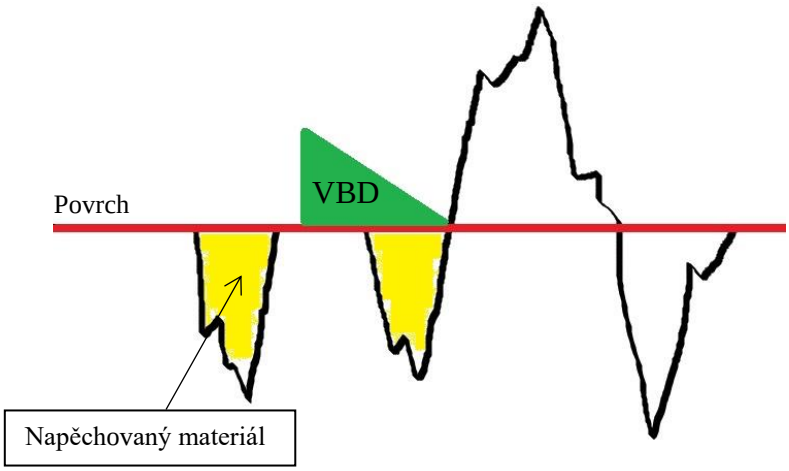
Na výslednou drsnost povrchu má podstatný vliv kromě geometrie nástroje také řezný parametr rychlosti posuvu f. Hladíci geometrie (Wiper) se proti standardním ISO destičkám liší hladicí částí břitu, která navazuje na poloměr špičky. *„Konstrukce VBD s hladicí geometrií je provedena tak, že hladicí segment na vedlejším břitu má menší úhel nastavení proti standardním VBD. Tím je dosaženo snížení výšky stopy, kterou po sobě zanechává špička nástroje.“* [26]



Obrázek 26 - Snížení drsnosti u hladící geometrie nástroje [Walter AG]

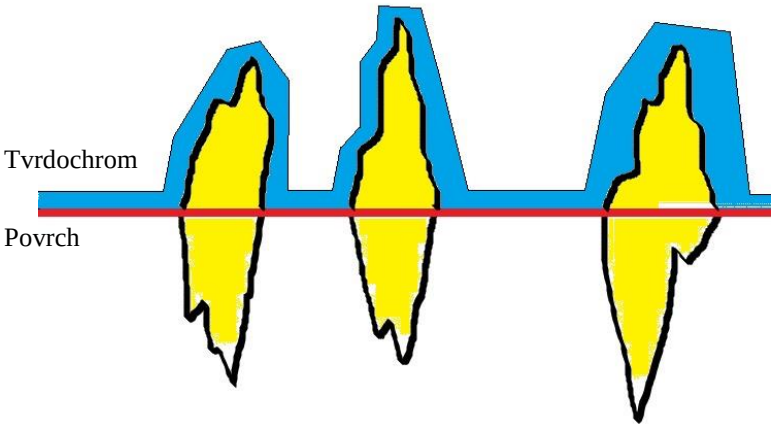
Z důvodu požadavku na vysokou jakost povrchu byla pro tento díl zvolena VBD s hladící geometrií, která umožňuje dosahovat drsnosti povrchu až Ra 0,1 během operace soustružení bez potřeby zvláštní dokončovací operace. Zároveň je umožněno zvýšení posuvu na dvojnásobek při zachování nízké drsnosti povrchu. Vyšší posuv znamená vyšší produktivitu a opět úspory výrobních nákladů.

Hlavní z teorií, proč došlo k nárůstu drsnosti po povrchové úpravě, vychází právě z principu zahlazování povrchu pomocí hladícího wiperu na výměnné břitové destičce. Při samotném procesu hlazení povrchu totiž dochází ke srovnání povrchových nerovností procesem podobným tváření. Wiper na VBD způsobuje pěchování povrchových výstupků do prohlubní a dochází tak k dokonalému uhlazení povrchu. Napěchovaný materiál v prohlubních ale není spojitý se zbytkem jádra.



Obrázek 27 - Nákres pěchování materiálu při hlazení

V rámci předúprav před chromováním se provádí elektrolytické odmašťování, při kterém se otáčí polarita v lázni. Domněnka je taková, že vlivem změn polarit dojde k zelektrizování nespojitého vpěchovaného materiálu na povrchu součásti, jehož následkem se vpěchovaný materiál vzpřímí nad povrch a tím způsobí nárůst drsnosti, jako je znázorněno na obrázku č. 28. Nanesená povrchová úprava funkčního chromu pak zkopíruje povrchové nerovnosti a zachovává zvýšenou drsnost po elektrolytickém odmaštění, která je doprovázena vizuální nekvalitou, kdy povrch jádra ztrácí lesklý povrch a obsahuje matné mapy.

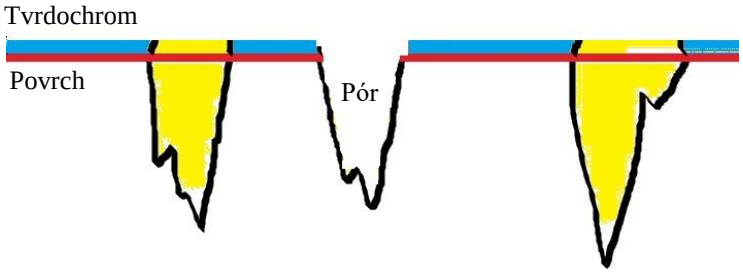


Obrázek 28 - Nákres povrchu po chromování

Pro nárůst drsnosti bylo zavedeno nápravné opatření, při kterém se jádra po chromování nechala přeleštit. Drsnost se po leštění zdála být v pořádku a opět splňovala požadavky na jakost, ale časem bylo prakticky ověřeno, že povrchová vrstva neplní svůj účel a začíná korodovat.

Bylo zjištěno, že vrstva není celistvá a obsahuje póry, které jsou další z kritických vad vyhodnocených v Paretově analýze v kapitole 2.4. Vzniklými póry se pak do základního materiálu rozšířila koroze. Tento jev podporuje teorii s napěchovaným nesoudržným materiálem v povrchové vrstvě, který se zvedne při elektrolytickém odmašťování.

Za příčinu narušení soudržnosti povrchové vrstvy bylo stanoveno broušení, při kterém dojde k odstranění vyčnívajícího materiálu včetně povrchové úpravy, případně může dojít ke kompletnímu vytržení nesoudržného materiálu až na materiál základní, jak můžeme vidět na zjednodušeném schématickém obrázku níže. Funkční chrom tímto ztrácí své korozivzdorné vlastnosti a není schopen zabránit šíření koroze až k základnímu materiálu.



Obrázek 29 – Nákres leštěného povrchu

Nárůstky na hranách by mohly být teoreticky způsobeny drobným rádiusem na hraně, vznikajícím kvůli opotřebení špičky nástroje, jenž by ponechávalo vytaženou hranu na jádru, která by po nanesení povrchové vrstvy ještě narostla.

2.5.2. Nekvalita povrchové úpravy

Všechna provedená měření na první pohled nenasvědčovala vnitropodnikovému pochybení, protože kontrolované parametry během výroby neměly žádné významnější odchylky od požadovaných hodnot a k odchylkám došlo až v momentě, kdy se jádra vrátila po povrchové úpravě z kooperace. Jako protipól teorie s příčinou vady v superfinišování pomocí výměnné břitové destičky s hladící geometrií se tedy nabízí možnost pochybení ze strany kooperace, která obstarává povrchovou úpravu tvrdochromu.

Vzhledem k tomu, že nanášení vrstvy tvrdochromu probíhá u externí firmy, není možné získat podrobnosti o parametrech procesu chromování, kvůli ochraně know-how. Odhalené kritické vady ale špatně nastaveným parametrům procesu chromování nasvědčují.

Všechny odhalené kritické vady mají prokazatelnou souvislost s tvorbou vrstvy funkčního chromu, kde rozbor možných vad, které vznikají právě při funkčním chromování, je více rozepsán v kapitole 1.3 v teoretické části práce.

Nejčetnější z kritických vad, tedy nárůst povrchové drsnosti a s tím spojená vizuální nekvalita v podobě zmatnělého povrchu namísto lesklého, může vznikat následkem nízké teploty lázně a vysoké proudové hustoty, snížení obsahu kovu v lázni, znečistění lázně a poklesem obsahu kyseliny sírové jakožto katalyzátoru.

Kritickou vadou byla shledána dále pórovitost, kterou může v procesu chromování způsobit nekvalitní vstupní materiál, což bylo vyloučeno, nebo špatné řešení zavěšení dílu, které neumožňuje unikání vodíkových bublin, jejichž ulpívání způsobuje vznik pórů.

Poslední kritickou vadou byly nárůstky na hranách jádra, které by během procesu chromování mohla mít na svědomí velká proudová hustota, nízká teplota lázně nebo kal v lázni, který by vznikal rozpouštěním nečistot v lázni.

Příčiny vzniku kritických vad během procesu chromování se vzájemně nevylučují, naopak spolu úzce souvisí, a proto je teorie o pochybení kooperanta na místě.

2.6. Nápravná opatření

2.6.1. Optimalizace procesu soustružení

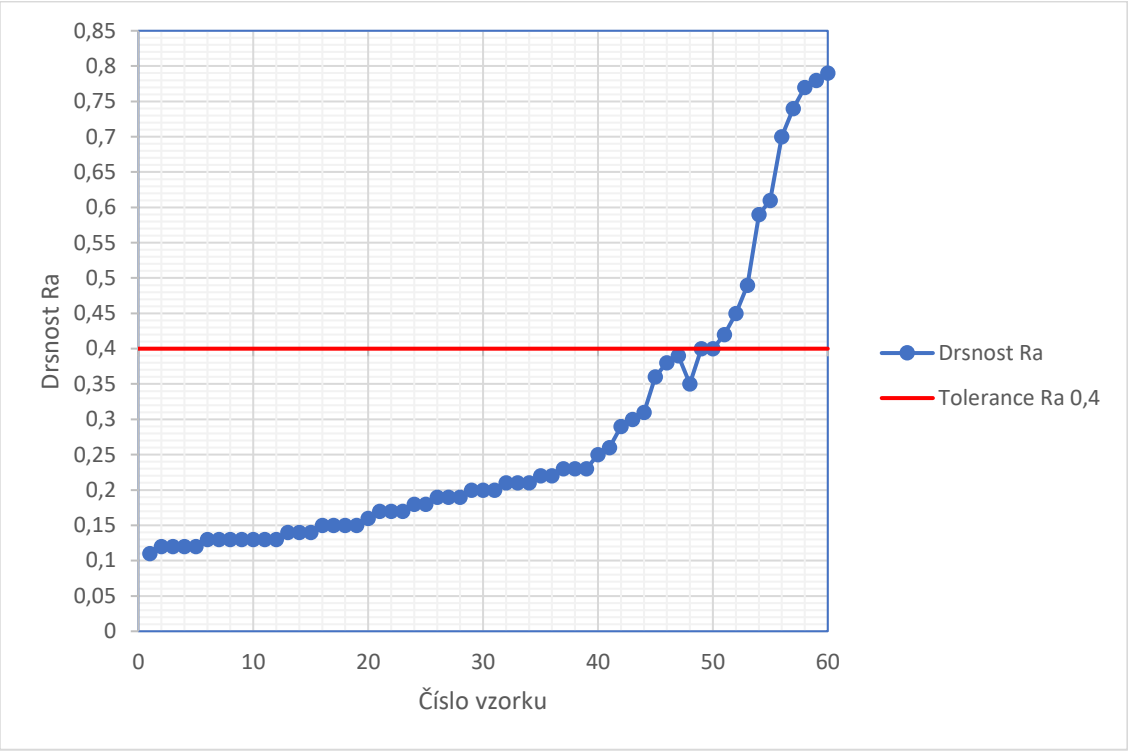
Na základě průběžného sledování výrobního procesu soustružení bylo zjištěno, že při soustružení a dokončovacím hlazení povrchu výměnnou břitovou destičkou s hladící geometrií dochází k rychlejšímu opotřebení břitů, než se předpokládalo. Vývoj nárůstu drsnosti bez průběžné výměny nástroje můžeme vidět v tabulce č. 6 níže, která obsahuje střední hodnoty naměřené povrchové drsnosti Ra. Červeně označené hodnoty nesplňují toleranci Ra 0,4 stanovenou na výkrese (viz příloha A).

Tabulka 6 - Vývoj drsnosti povrchu při soustružení

Statistika drsnosti povrchu po obrábění diamantem					
Vzorek č.	Drsnost Ra	Vzorek č.	Drsnost Ra	Vzorek č.	Drsnost Ra
1	0,11	21	0,16	41	0,25
2	0,12	22	0,17	42	0,29
3	0,12	23	0,17	43	0,30
4	0,12	24	0,17	44	0,31
5	0,12	25	0,18	45	0,36
6	0,12	26	0,19	46	0,38
7	0,13	27	0,19	47	0,40
8	0,13	28	0,19	48	0,35
9	0,13	29	0,20	49	0,40
10	0,13	30	0,20	50	0,4
11	0,13	31	0,20	51	0,42
12	0,13	32	0,20	52	0,45
13	0,14	33	0,21	53	0,49
14	0,14	34	0,21	54	0,59
15	0,14	35	0,22	55	0,61
16	0,15	36	0,22	56	0,70
17	0,15	37	0,22	57	0,74
18	0,15	38	0,23	58	0,77
19	0,15	39	0,23	59	0,78
20	0,16	40	0,24	60	0,79

K nárůstu opotřebení výměnných břitových destiček mohlo docházet vlivem přítomnosti strusky a tvrdých částic, které rychleji opotřebily karbidovou povlakovou vrstvu na nástrojích pro soustružení, kde došlo k otupení břitu výměnné břitové destičky. Superfinišovací destička s hladící geometrií pak povrchové nerovnosti napěchovala do povrchových prohlubní a způsobila problém popsaný v kapitole 2.5.1. Grafické znázornění růstu drsnosti bez průběžné výměny nástroje můžeme pozorovat na grafu č. 3 níže.

Graf 3 - Nárůst drsnosti Ra během procesu soustružení



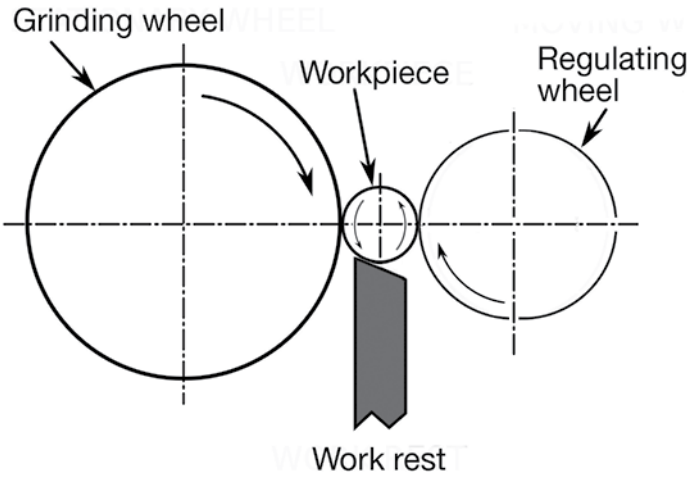
Podle empiricky zjištěných hodnot bylo stanoveno, že se po každém 40. vyrobeném kusu otočí výměnná břitová destička, aby byla bezpečně zajištěna požadovaná povrchová drsnost. Na grafu výše můžeme vidět, že se na hranici 40 kusů začíná vytrácet určitá lineárnost nárůstu povrchové drsnosti. Díky této optimalizaci by měl být omezen výkyv povrchové drsnosti během procesu soustružení.

2.6.2. Centerless broušení před povrchovou úpravou

Jako možnost vyřešení problému dokončovacího soustružení pomocí VBD s hladící geometrií se ukázalo bezhrotové (centerless) broušení, které by mohlo nahradit proces superfinišování na soustruhu před nanesením povrchové úpravy.

Dosažitelná jakost povrchu se u bezhrotového broušení pohybuje okolo Ra 0,2, což by vyhovovalo požadavku na povrchovou drsnost a tato technologie je tedy pro superfinišování povrchu před povrchovou úpravou vyhovující.

„Princip bezhrotového broušení je založen na rotaci obrobku mezi brusným (grinding wheel) a podávacím válcem (regulating wheel), který se opírá o opěrnou lištu“, jako můžeme vidět na schématickém obrázku níže.



Obrázek 30 - Schéma centerless broušení [Cutting tool engineering]

Podávací válec rotující nižšími otáčkami slouží k osovému posuvu součásti a bývá obvykle kvůli prevenci poškození dílu vyroben z měkkého materiálu, jako je pryž. Brusný válec rovnoměrně obrábí povrch obrobku a z důvodu zvýšení brusné rychlosti má oproti posuvnému válci dvojnásobný rozměr. [27]

Mezi hlavní výhody centerless broušení patří vysoká produktivita, nenáročná obsluha stroje, snadná automatizace a seřizování, plynulost průchozího broušení a také hospodárnost. Vzhledem k efektivitě a hospodárnosti je tedy přesunutí dokončovací operace povrchu do kooperace na centerless broušení akceptovatelné.

Na rozdíl od broušení mezi hroty není třeba středit ani upínat obrobek a nový obrobek se vkládá již při broušení předcházejícího, takže je proces broušení daleko plynulejší. Mezi další výhody bezhrotého broušení patří krátké časy operace a zmenšení potřebných přídavků před broušením a z toho plynoucí úspora materiálu. [27]

Absence upínání a středění kusu ovšem s sebou nese i nevýhody jako možné snížení kruhovitosti a vznik zvlnění povrchu, čemuž ale lze zamezit precizním seřízením. Pro zpřesnění procesu je důležité uložení podávacího kotouče a orovnání. Seřízení bezhrotých brusek je sice ve svém principu jednoduché, ale časově náročné, tudíž se nevyplatí nasazovat na malé výrobní série. Další nevýhodou je, že nelze zajistit souosost bezhrotě broušené plochy s jinými již obrobenými plochami, tedy nelze brousit přerušované plochy, jako může být například drážka pro pero. Broušené jádro ale žádné přerušované plochy nemá, takže tato nevýhoda v našem případě nepředstavuje problém. [27]

Centerless broušení by mělo být řešením vady nedodržené jakosti povrchu i vizuální nekvality s ním spojené, tedy odstraněním dvou kritických vad z výrobního procesu.

2.6.3. Přeleštění čelních nárůstů chromu na čelech jádra

Jednou z kritických vad, která se během výrobního procesu objevila, byly nárůstky vrstvy chromu na hranách jádra. Odstranění těchto nárůstků povrchové úpravy na čelech jádra je možné řešit přeleštěním na hrotovém soustruhu SV RA/750. Vzhledem k funkci jádra je zásadní dodržení průměru 30 - 0,04 mm (viz výkres v příloze A), proto jsou nárůstky na hranách nepřípustné.

2.6.4. Změna parametrů během tvrdého chromování

Pochybení ze strany kooperanta během vytváření povrchové úpravy nebylo možné zcela ověřit kvůli průběhu operace v externí firmě. Dle provedených experimentálních měření byla dodržena minimální požadovaná tloušťka povrchové úpravy, ale zkoušku korozní odolnosti v solné mlze nepovažuji za zcela prokazatelný důkaz o kvalitě povrchové vrstvy, protože urychlené zkoušky korozivzdornosti v agresivním prostředí mají spíše informativní charakter a nevypovídají o korozní odolnosti v praxi, během cyklického namáhání dílu. Z tohoto důvodu by bylo lepší díl podrobit dalším zkouškám jakosti povrchové úpravy.

Nárůstky chromu na hranách jádra a matný povrch vnějšího chromovaného pláště jádra by podle kapitoly 1.3 týkající se vad mohly způsobit špatně nastavené parametry chromovací lázně. Hrubý a matný povrch může být způsoben nízkou teplotou a vysokou proudovou hustotou v lázni, stejně tak může být způsoben znečištěním lázně nebo úbytkem složek pro proces chromování nezbytných.

Pro lepší určení jakosti vrstvy funkčního chromu bych do experimentálních metod zařadil měření mikrotvrdosti podle Vickerse, indikaci pórovitosti povlaku barevnou reakcí zkušebního činidla podle normy ČSN EN ISO 10308, nebo ideálně některou z cyklických zkoušek korozní odolnosti.

Vzhledem k provedení povrchové úpravy v externí firmě, budou odhalené podněty z práce použity pro diskuzi s kooperantem, kde bude od kooperanta požadováno experimentální ověření kvality povrchové úpravy, na jehož základě by bylo možné pochybení ze strany kooperanta prokázat či vyloučit.

2.7. Diskuze odhalených příčin

Na základě provedené analýzy výrobního procesu byly jako kritické vady shledány nedodržená drsnost, vizuální nekvalita, pórovitost a nárůstky na hranách jádra. Jako nápravná opatření pro předcházení vadám byl zvolen následující postup:

1. Optimalizace procesu soustružení
2. Centerless broušení před chromováním
3. Přeleštění čelních nárůstů
4. Prověření parametrů během chromování

Teorie pro vznik nekvality byly stanoveny dvě. Ta první předpokládá, že drsnost narostla kvůli pěchování nespojitého materiálu do povrchových nerovností díky hladící geometrii superfinišovacího nástroje. Nespojitý napěchovaný materiál při elektrolytickém odmaštění pak vystoupil nad povrch a povrchová úprava zkopírovala zdrsněný povrch jádra. Následné přeleštění pak sice vyřešilo drsnost povrchu, ale narušilo

celistvost povrchové úpravy a došlo ke vzniku pórů, které propustily korozi k základnímu materiálu. Nedodržená drsnost, vizuální nekvalita a pórovitost by tedy pramenila ze soustružení. Aby byly povrchové nerovnosti co nejmenší a materiál se do nich nepěchoval, byl empiricky určen počet cyklů, po kterém dojde k výměně nástrojů.

Alternativou pro vyřešení pěchování nespojitého materiálu je zařazení bezhrotého broušení jako superfinišování před chromováním, které by mělo zcela zamezit problému s pěchováním nespojitého materiálu.

Vada čelních nárůstů byla vyřešena přeleštěním čel jádra po chromování, tato vada je však spojena s procesem chromování, proto by bylo vhodné zařadit prověření parametrů chromovací lázně.

Druhá teorie se opírá o prokazatelnou souvislost nekvality s procesem nanášení povrchové úpravy, kde by vady jako nárůsty chromu na čelech a drsný, zmatnělý povrch mohlo způsobit špatné nastavení parametrů chromovací lázně, její složení, případně nedostatečná čistota lázně. V této oblasti není možné nápravná opatření stanovit, protože je povrchová úprava vyhotovena v kooperaci. Z důvodu podložení této teorie o pochybení kooperanta by bylo vhodné ještě kvalitu povrchové úpravy prověřit jinými než v práci použitými metodami, které pochybení neprokázaly ani nevyvrátily. Jako nápravné opatření by se měly zkontrolovat parametry procesu chromování a případně optimalizovat jejich nastavení. Krajní možností by pak byla změna kooperanta nebo záměna funkčního chromu za nějakou z alternativ rozepsaných v kapitole 1.4 Alternativy pro tvrdochrom.

3. Závěr

Cílem práce bylo analyzovat faktory ve výrobním procesu, kvůli kterým docházelo k četné nekvalitě. Dále odhalit příčiny, kvůli kterým k nekvalitě výsledného produktu jádra z automatové oceli s povrchovou vrstvou tvrdochromu došlo a stanovit nápravná opatření, která odhalené vady eliminují.

Na základě provedených experimentálních metod ověření kvality byly pomocí Paretovy analýzy stanoveny čtyři kritické vady, které je z procesu potřeba odstranit, aby se zmetkovitost snížila o 80%. Pro vznik těchto vad byly vyhotoveny dvě teorie.

Podle první teorie je příčinou vzniku všech kritických vad hladící geometrie nástroje, který se používá při soustružení. Pro odstranění těchto vad byl stanoven následující postup optimalizace výrobního proces:

- Optimalizace procesu soustružení – častější výměna nástrojů
- (alternativní možnost) Změna metody superfinišování na centerless broušení
- Přeleštění případných čelních nárůstků

Druhá teorie jako příčinu všech kritických vad vnímá špatné nastavení procesu chromování a pro odstranění nekvality byl stanoven tento postup:

- Kontrola parametrů procesu chromování a jeho případná optimalizace
- (alternativní možnost) Změna kooperanta pro povrchovou úpravu
- (alternativní možnost) Náhrada technologie funkčního chromování alternativou

Nevylučuje se ani možnost, že k nekvalitě výsledného produktu vedla kombinace negativních vlivů z obou rozepsaných teorií.

Citovaná literatura

[1] MUDROCH, O. *Chromování - tvrdé a porosní povlaky.* Praha : SNTL, 1959.

[2] Prvky. [Online] Chemické Prvky, 2010. [Citace: 15. 12 2019.] http://www.prvky.com/24.html. dgdg.

[3] VOJTĚCH, D. *Kovové materiály.* Praha : VŠCHT, 2006. ISBN 80-7080-600-1.

[4] Integrovaný registr znečišťování. [Online] Ministerstvo životního prostředí České republiky, 2018. [Citace: 28. 12 2019.] https://www.irz.cz/repository/latky/chrom_a_jeho_slouceniny.pdf.

[5] JIRÁSEK, J., SIVEK, M. a LÁZNIČKA, P. *Ložiska nerostů.* Ostrava : Anagram, 2010.

[6] BENCO, V., CIKRT, M. a LENER, J. *Toxické kovy v pracovní a životním prostředí.* Praha : Avicenum, 1984.

[7] TULKA, J. *Povrchové úpravy materiálů.* Brno : VUT, 2005. ISBN 80-214-3062-1.

[8] ENŽEL, R., a další. Náhrada tvrdého chromování žárovými nástřiky. [Online] 2002. [Citace: 10. 3 2020.] http://metal2014.tanger.cz/files/proceedings/metal_02/papers/29.pdf.

[9] KRAUS, V. *Povrchy a jejich úpravy.* Plzeň : Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-668-1.

[10] KREIBICH, V. Chromové povlaky. *Povrcháři.* Únor 2009.

[11] VRBATA, V. a OBR, L. *Dekorativní chromování bez sloučenin šestivalentního chromu.* Žilina : TechPark, 2008.

[12] BENEDIKT, V. *Povrchové úpravy kovových materiálů.* Plzeň : Editační středisko VŠSE, 1985.

[13] OBR, L. Důležité aspekty v technologii funkčního chromování. [Online] Engineering.sk, 2020. [Citace: 15. 1 2020.] https://www.engineering.sk/clanky2/povrchove-upravy/4172-dulezite-aspekty-v-technologii-funkcniho-chromovani.

[14] MOHYLA, M. *Technologie povrchových úprav kovů.* Ostrava : VŠB, 1995. ISBN 80-7078-267-6 .

[15] *Funkční chromování.* OBR, L. 4, Duben 2008, MM Průmyslové spektrum, str. 66.

[16] NĚMEC, D. - Kolektiv. *Strojírenská technologie 3.* Praha : STNL, 1982.

[17] FALTÝNKOVÁ, A. Vady při funkčním chromování. *Povrcháři.* Červenec 2015, str. 10-12.

[18] *Progresivní řešení náhrady tvrdého chromování.* F., ZAHÁLKA a R., ENŽEL. 4, Duben 2005, MM Průmyslové spektrum, str. 80.

[19] *Kompozitní Cr povlaky pro pístní kroužky.* CHOCHOLATÝ, O. a KŘÍŽ, A. 3, 2014, Koroze a ochrana materiálů, str. 84-87.

[20] *Funkční chromování - Heef 25.* OBR, L. Jihlava : autor neznámý, 2008. Přednáška HEEF 25 .

[21] SAIDL, M. HEF Groupe - Nitridace - ARCOR a TENIFER. [Online] HEF Groupe, 2015. [Citace: 10. 3 2020.] http://www.hef-durferrit.cz/.

[22] Lintech. Laserové navařování. [Online] Lintech, 2011. [Citace: 12. Březen 2020.] https://www.lintech.cz/produkty/laserove-technologie/laser-podle-aplikace/ostatni-laser-podle-aplikace/laserove-navarovani/.

[23] TOYSERKANI, E., KHAJEPOUR, A. a CORBIN, S. *Laser Cladding.* Boca Raton, Florida : CRC Press, 2005.

[24] KOŘÁN, P. Seriál na téma lasery - Laserové svařování I. *Lasery a optika.* [Online] 18. Únor 2013. [Citace: 10. Duben 2020.] http://www.lao.cz/lao-info-49/serial-na-tema-lasery---laserove-svarovani-i-laser-welding-134.

[25] PROŠEK, T. Urychlené cyklické korozní zkoušky. [Online] Technopark Kralupy, 2016. [Citace: 28. Leden 2020.] https://www.degruyter.com/downloadpdf/j/kom.2016.60.issue-2/kom-2016-0008/kom-2016-0008.pdf.

[26] *Břitové destičky s hladící geometrií a VBD s nízkým řezným odporem.* Pramet Tools, s. r. o. 5, Květen 2003, MM Průmyslové spektrum, str. 48.

[27] NOVOTNÝ, A. *Broušení na bezhrotových bruskách.* Praha : SNTL, 1962.

Seznam použitých obrázků

Obrázek 1 - Chrom 13
Obrázek 2 - Oxid chromitý 16
Obrázek 3 - Dekorativně ochranná úprava nádrže [Vladimír Janovský – renovace motocyklů JAWA] 20
Obrázek 4 - Aplikace tvrdého chromování [BOMEX - CZ s.r.o.] 23
Obrázek 5 - Schéma procesu chromování [Surftech Engineering Pvt. Ltd.] 27
Obrázek 6 - Příklad chromovací lázně [Flowline, Inc.] 29
Obrázek 7 - Schéma dokončovacího obrábění [16] 31
Obrázek 8 - Příklad vady v adhezi vrstvy s výskytem makrotrhlin [Engineering Failure Analysis] 32
Obrázek 9 - Schéma technologie HVOF [Eastern Metallizing Co Private Limited] 39
Obrázek 10 - Struktura vrstvy ARCOR V [21] 42
Obrázek 11 - Struktura vrstvy ARCOR DT [21] 43
Obrázek 12 - Struktura vrstvy ARCOR L [21] 43
Obrázek 13 - Schéma technologie Laserového navařování [Laser Cladding Technologies] 45
Obrázek 14 - Proces laserového navařování [Synergy Additive Manufacturing, LLC] 46
Obrázek 15 - Rychlovypínač typu UR [Sécheron Hasler CZ spol. s r.o.] 47
Obrázek 16 - Schéma podsestavy rychlovypínače typu UR [Sécheron Hasler CZ spol. s r.o.] 48
Obrázek 17 - Chromovací lázeň [MZ-chrom, s.r.o.] 50
Obrázek 18 - Kontrola tloušťky chromované vrstvy 54
Obrázek 19 - Leštěné chromované vzorky před zkouškou 55
Obrázek 20 - Leštěné chromované vzorky po 240h exponování solné mlze 56
Obrázek 21 - Pochromované jádro z automatové oceli 57
Obrázek 22 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, Světelná mikroskopie 58
Obrázek 23 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, Světelná mikroskopie 58
Obrázek 24 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 1, SEM 58
Obrázek 25 - Metalografický snímek neleptaného vzorku 2, SEM 58
Obrázek 26 - Snížení drsnosti u hladící geometrie nástroje [Walter AG] 59
Obrázek 27 - Nákres pěchování materiálu při hlazení 60

Obrázek 28 - Nákres povrchu po chromování 61
Obrázek 29 - Nákres leštěného povrchu 62
Obrázek 30 - Schéma centerless broušení [Cutting tool engineering] 66

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Chemické složení oceli 11 109 48
Tabulka 2 - Mechanické vlastnosti oceli 11 109 48
Tabulka 3 - Přehled vad a četnost jejich výskytu 51
Tabulka 4 - Hodnoty měření drsnosti po soustružení 52
Tabulka 5 - Kontrola drsnosti po povrchové úpravě 53
Tabulka 6 - Vývoj drsnosti povrchu při soustružení 64

Seznam grafů

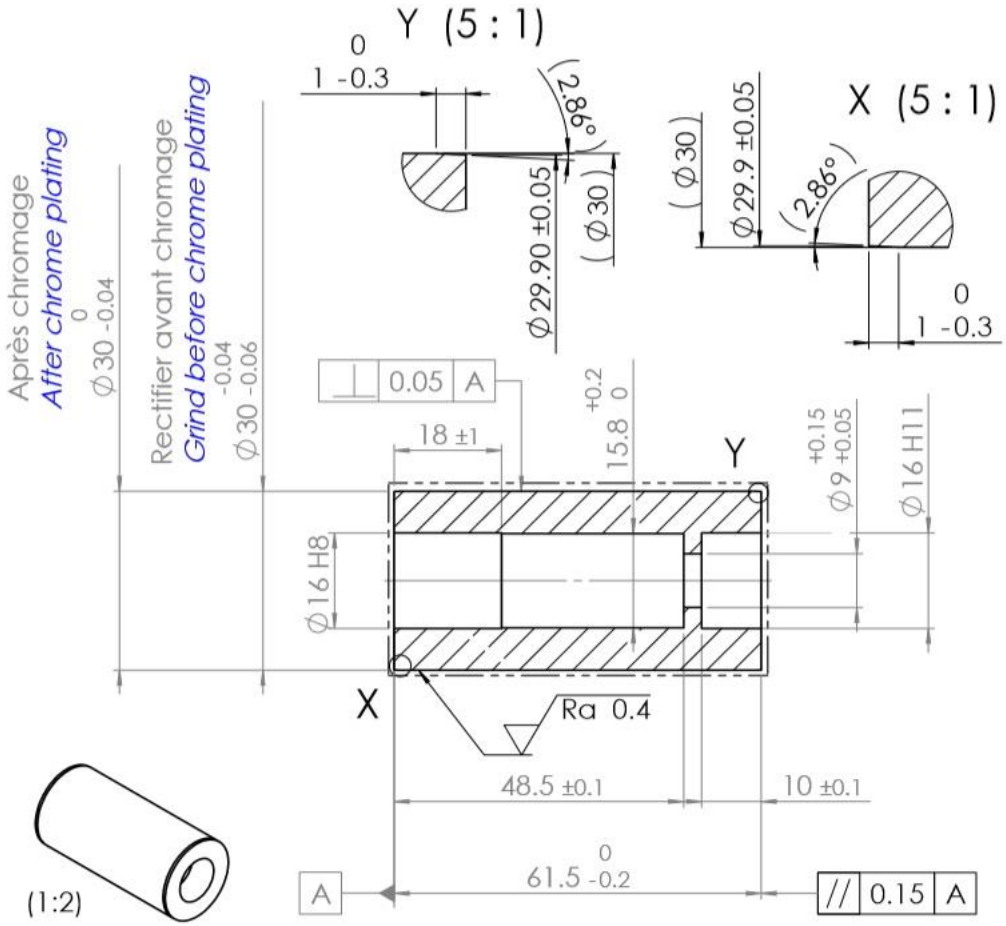
Graf 1 - Paretův diagram četnosti vad 51
Graf 2 - Statistika kontroly tloušťky vrstvy tvrdochromu 54
Graf 3 - Nárůst drsnosti Ra během procesu soustružení 65

Seznam příloh

Příloha A - Výřez výrobního výkresu 75
Příloha B - Snímky vzorků z korozní zkoušky NSS 76
Příloha C - Metalografické snímky 78

Přílohy

Příloha A – Výřez výrobního výkresu



Příloha B - Snímky vzorků z korozní zkoušky NSS

B.1 - Leštěné vzorky

Obr. 1: Vzorky před provedením korozní zkoušky

Obr. 2: Vzorky po 72h v solné mlze

Obr. 3: Vzorky po 144h v solné mlze

Obr. 4: Vzorky po 240h v solné mlze

B.2 - Neleštěné vzorky

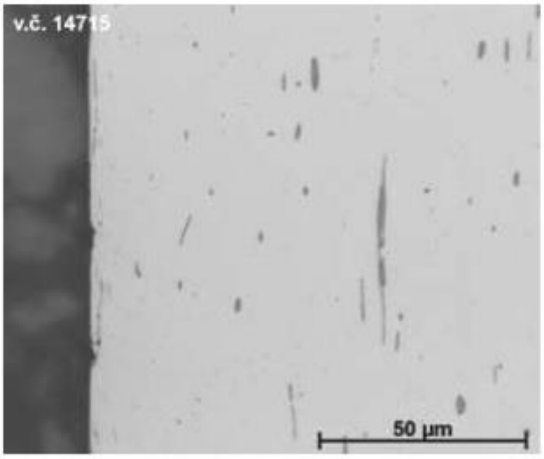
Obr. 5: Vzorky před provedením korozní zkoušky

Obr. 6: Vzorky po 72h NSS

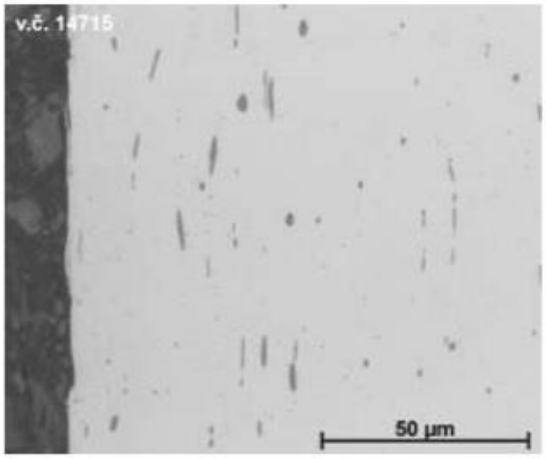
Obr. 7: Vzorky po 144h NSS

Obr. 8: Vzorky po 240h NSS

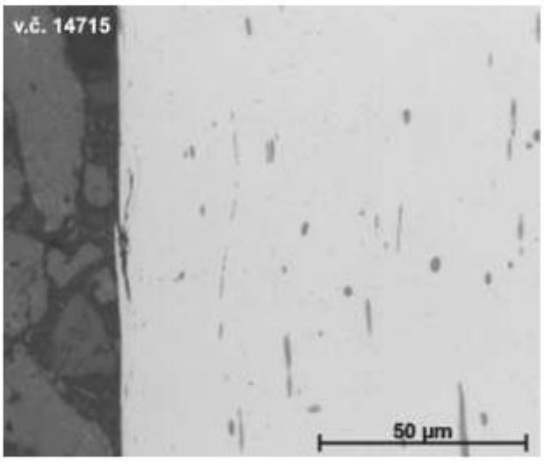
Obr. 1 Jedno z pěti dodaných ocelových jader HSBT431121P0001



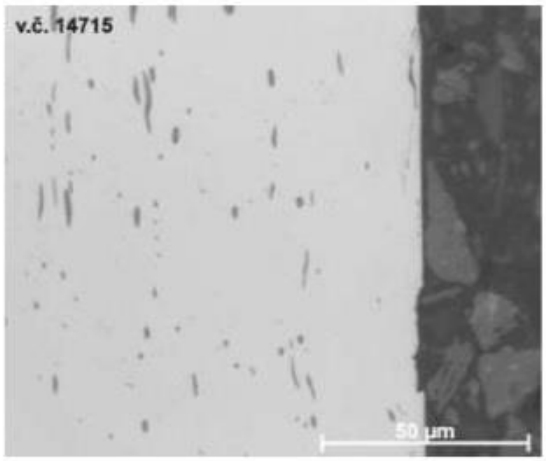
Obr. 2 Vzorek 1, místo I na povrchu, neleptáno



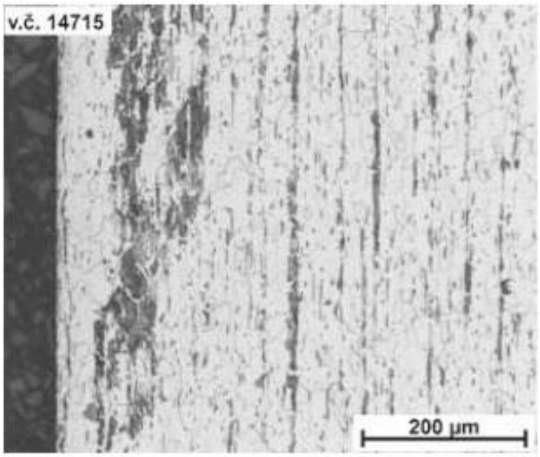
Obr. 3 Vzorek 1, místo II na povrchu, neleptáno



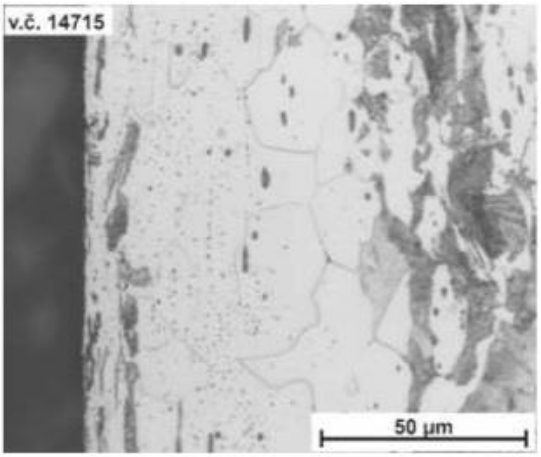
Obr. 4 Vzorek 1, místo III na povrchu, neleptáno



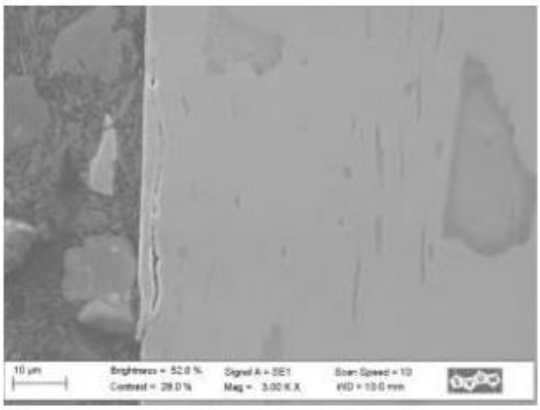
Obr. 5 Vzorek 1, místo IV na povrchu, neleptáno



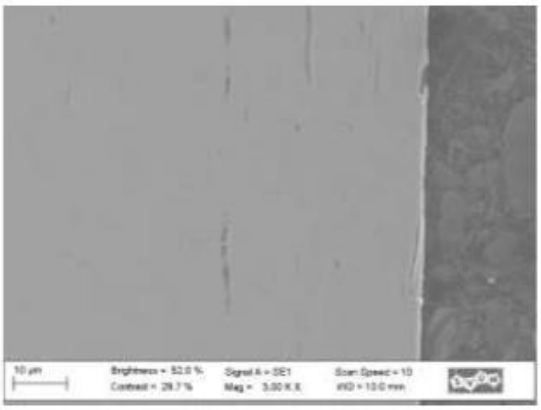
Obr. 6 Vzorek 1, struktura, leptáno



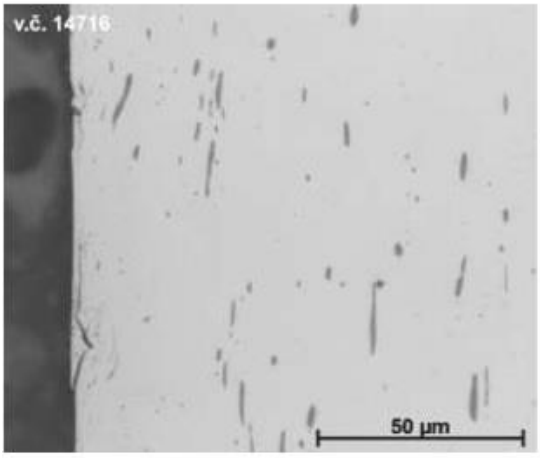
Obr. 7 Vzorek 1, detail struktury u povrchu, leptáno



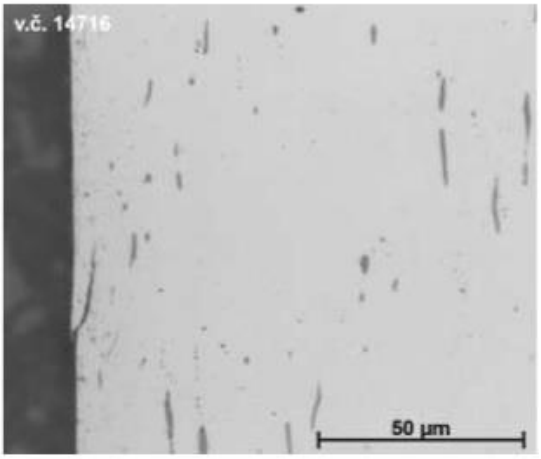
Obr. 8 Vzorek 1, povrch s vadou, SEM,



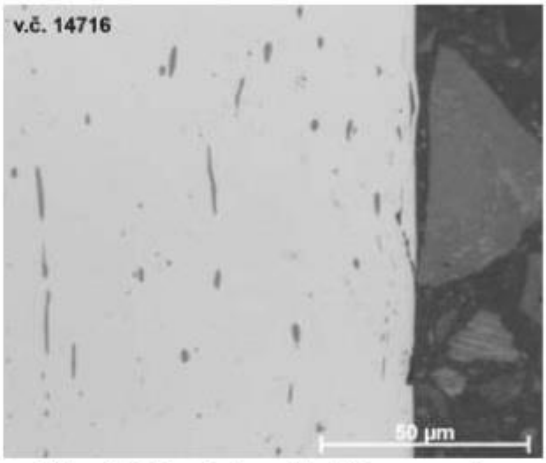
Obr. 9 Vzorek 1, povrch s vadou, SEM



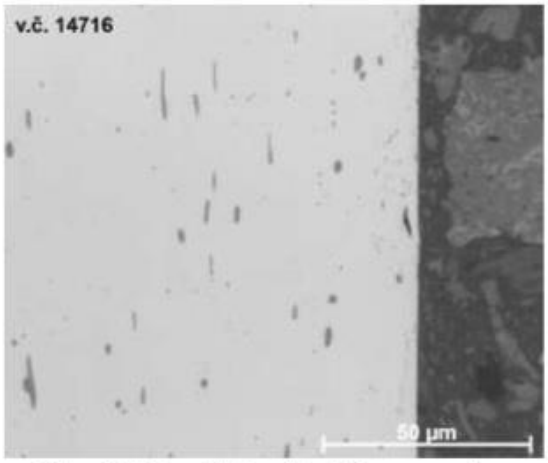
Obr. 10 Vzorek 2, místo I na povrchu, neleptáno



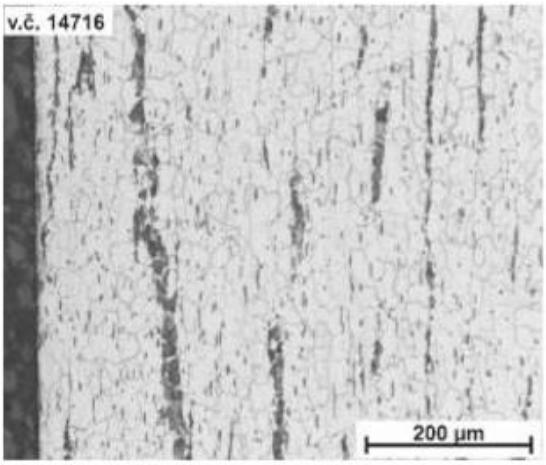
Obr. 11 Vzorek 2, místo II na povrchu, neleptáno



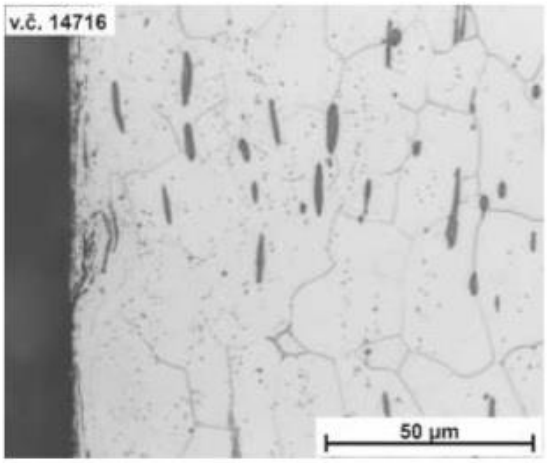
Obr. 12 Vzorek 2, místo III na povrchu, neleptáno



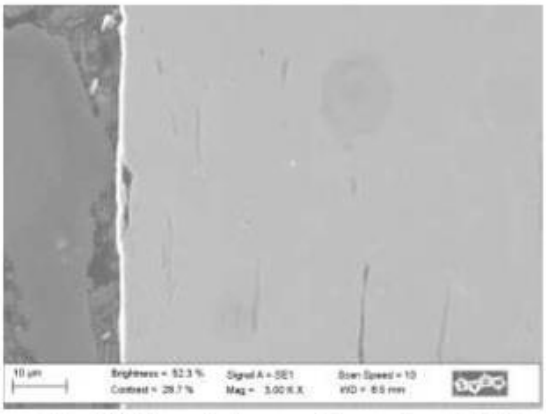
Obr. 13 Vzorek 2, místo IV na povrchu, neleptáno



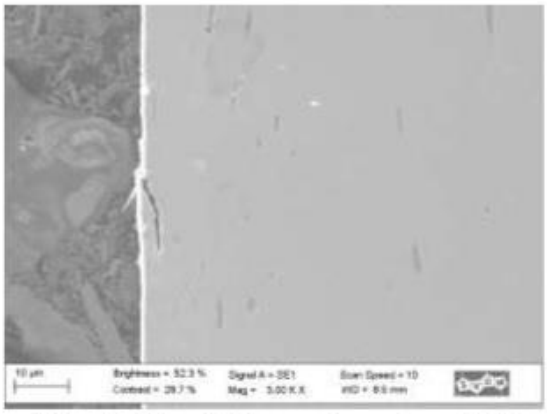
Obr. 14 Vzorek 2, struktura, leptáno



Obr. 15 Vzorek 2, detail struktury u povrchu, leptáno



Obr. 16 Vzorek 2, povrch s vadou, SEM



Obr. 17 Vzorek 2, povrch s vadou, SEM