



Možnosti oprav navařováním u nástrojové oceli H13

Bakalářská práce

Studijní program:

B2301 Strojní inženýrství

Studijní obor:

Strojní inženýrství

Autor práce:

Marek Černožorský

Vedoucí práce:

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

Ing. Totka Bakalova, Ph.D.
Katedra materiálu





Zadání bakalářské práce

Možnosti oprav navařováním u nástrojové oceli H13

Jméno a příjmení: **Marek Černožorský**
Osobní číslo: S17000282
Studijní program: B2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: Strojní inženýrství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: 2020/2021

Zásady pro vypracování:

1. Seznamte se teoreticky s navařováním funkčních vrstev. Podstata, specifika, výhody a nevýhody.
2. Provedte rešerši současného stavu navařování funkčních vrstev se zvýšenou otěruvzdorností.
3. Seznamte se s podstatou chování a strukturními změnami oceli H13 při svařování a tepelném zpracování.
4. Seznamte se s podstatou tribologických zkoušek definujících odolnost proti opotřebení.
5. Provedte volbu přídavných materiálů pro navařování oceli H13 a navrhnete experimentální program s ohledem na zvýšenou otěruvzdornost povrchu a s ohledem na možnost následné plazmové nitridace.
6. Provedte experimentální návary a posouzení jejich odolnosti metodou Ball on disc. Výsledky zpracujte.
7. Provedte zhodnocení výsledků a jejich diskuzi.



Rozsah grafických prací:
Rozsah pracovní zprávy:
Forma zpracování práce:
Jazyk práce:

tabulky, grafy
cca 30
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] KOUKAL, J., D. SCHWARZ a J. HAJDÍK. *Materiály a jejich svařitelnost*. Ostrava: Český svářečský ústav, 2009. ISBN 978-80-248-2025-5.
[2] NEUMANN, H. *Teorie svařování*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2014. ISBN: 978-80-7494-171-9.
[3] AWS Welding Handbook: Welding Science and Technology. 9th Ed., Vol.1, 2001.
[4] Tribology Handbook, Friction wear lubrication, Vol. 1, Edited by Prof. I. V. Kragelsky and V. V. Alisin (Translated from the Russian by Felix Palkin and Valerian Palkin), English translation, Mir Publishers, 1981.
[5] Taisho Hasegawa. *Tribology research trends*, Nova Science Publishers, Inc., 2008 New York
[6] Tribologické zkoušení dle norem ASTM G99 (ASTM G99-95), ASTM G133 a DIN 50324.

Vedoucí práce: doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce: Ing. Totka Bakalova, Ph.D.
Katedra materiálu

Datum zadání práce: 15. listopadu 2020

Předpokládaný termín odevzdání: 15. května 2022

L.S.

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
vedoucí katedry

V Liberci dne 15. listopadu 2020





Prohlášení

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

Jsem si vědom toho, že na mou bakalářskou 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 bakalářské práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li bakalářskou 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 bakalářská 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.

13. května 2022

Marek Černohorský

Anotace

Tato bakalářská práce řeší problematiku navařování kovových funkčních povrchů, s cílem opravy původní poškozené vrstvy na nástrojové oceli AISI H13. V teoretické části je popsáno využití a problematika funkčních vrstev, provedena rešerše návarových materiálů na ocel AISI H13 či zmíněné způsoby opotřebení povrchů. Dále jsou popsány svařovací technologie a podrobněji popsán způsob svařování metodou TIG. Následně je charakterizována samotná ocel AISI H13 a možnosti její následné úpravy. Na konci teoretické části je popsána metoda tribologické zkoušky, konkrétně metoda Ball-on-Disc, která je použita v experimentální části. V experimentální části se tato práce zabývá nejprve volbou vhodných materiálů pro opravu a zvýšení tribologických vlastností opravené součástky a následně jsou tyto materiály navařeny na ocel AISI H13. Dále je provedena zkouška tvrdosti dle Vickerse pro porovnání původní, promíšené a nově vytvořené oblasti. S ohledem na naměřené hodnoty tvrdosti a možnost následné povrchové úpravy, konkrétně nitridace, je zvolen jeden přídatný materiál na kterém je provedena nitridace povrchu. Navařený a nitridovaný materiál byly tribologicky testovány metodou Ball-on-Disc a to za pokojové teploty za zvýšených teplot.

Klíčová slova

Svařování, navařování, degradační procesy, metoda TIG, nástrojová ocel AISI H13, mechanické vlastnosti, tribologické vlastnosti, opotřebení



Annotation

This bachelor's thesis addresses the issue of surfacing of metal metal functional surfaces, in order to repair the original damaged layer on tool steel AISI H13. The theoretical part describes the use and problems of layers, a search of welding materials for steel AISI H13 or the mentioned methods of surface wear. The welding technologies and the TIG welding method are described in more detail below. Subsequently, the AISI H13 steel itself and the possibilities of its subsequent modification are characterized. At the end of the theoretical part is the tribological test method, specifically the Ball-on-Disc method, which is used in the experimental part. In the experimental part, this work first deals with suitable materials for repair and increase the tribological properties of the repaired component and then these materials are welded to AISI H13 steel. Furthermore, a Vickers hardness test is performed to compare the original, mixed and newly created area. With regard to the measured hardness values and the possibility of subsequent surface treatment, in particular nitriding, one additional material is chosen on which the surface nitriding is performed. Welded and welded and nitrided material were tested by Ball-on-Disc method at real temperatures and at elevated temperatures.



Poděkování:

„Chtěl bych tímto poděkovat všem za podporu během celého mého studia především pak svému vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Jaromíru Moravcovi, Ph.D. přínosné rady a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat své rodině a kamarádům za důvěru a podporu. Děkuji také Katedře strojírenské technologie za možnost zázemí mé bakalářské práce a jejich vřelý přístup.“

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 9 |
| 2. Teoretická část..... | 10 |
| 2.1. Charakteristika funkčních vrstev..... | 10 |
| 2.1.1. problematika opotřebení funkčních vrstev a druhy poškození..... | 10 |
| 2.1.2. požadavky na funkční vrstvy – důraz na ořezuvzdornost..... | 16 |
| 2.1.3. řešení materiálů návarových vrstev na ocel AISI H13..... | 18 |
| 2.2. Základní charakteristika procesu navařování a sváření..... | 21 |
| 2.2.1. Stručná charakteristika obloukových metod použitelných pro navařování..... | 22 |
| 2.2.2. Podrobná charakteristika metody TIG..... | 24 |
| 2.3. Charakteristika oceli AISI H13..... | 26 |
| -obecné vlastnosti, použití | |
| -strukturní změny oceli H13 při svařování a tepelném zpracování a s tím související problematika při navařování | |
| 2.4. Tribologické zkoušky..... | 28 |
| -podstata tribologie | |
| -metoda Ball-on-disk | |
| 3. Experimentální část..... | 30 |
| 3.1. Volba návarového materiálu..... | 30 |
| 3.2. Realizace navaření nových vrstev..... | 32 |
| 3.3. Hodnocení tribologických vlastností materiálu..... | 38 |
| 4. Diskuze výsledků..... | 46 |
| 5. Závěr..... | 49 |

1. Úvod

Životnost strojů a strojních zařízení je otázkou a sledovaným parametrem snad ve všech technických odvětvích. Právě poškození rozhodujících součástí nebo konstrukčních uzlů může mít za následek vyřazení celého stroje až fatální kolaps například výrobní linky. I když je v praxi věnována větší pozornost procesům náhlého porušení, tak z průzkumů provozních poruch vyplývá, že za až 80% poruch mohou procesy opotřebení důležitých součástí a konstrukčních uzlů.[1] Co je tedy možné udělat proto, aby se toto procento snížilo? Odpovědi jsou povrchové úpravy či opravy právě nejvíce namáhaných součástí. Pomocí širokého spektra technických procesů je možné upravit povrch součástky na co nejodolnější vůči rozhodujícím degradačním procesům jako je koroze nebo třeba abraze, adheze, kavitace, eroze, vibrace či prostá únava materiálu. Primární zdroj opotřebení je prakticky vždy tření, proto mu bude v této práci věnována větší pozornost. Za běžného provozu se samozřejmě jedná o kombinaci různých druhů namáhání, a proto i materiál této funkční či ochranné vrstvy na povrchu kovových materiálů musí mít kombinovanou odolnost tak aby vyhovoval provoznímu nasazení. Použití standardních kovových materiálů naráží na své meze, proto je potřeba tyto meze maximalizovat za pomoci již známých materiálů. Pro překonání těchto mezí by bylo zapotřebí využít kompozitních materiálů, které jsou schopné kombinovat charakteristické vlastnosti kovových materiálů (houževnatost, plasticitu, tepelnou a elektrickou vodivost), keramických materiálů (pevnost, tvrdost, tepelná stabilita) nebo polymerních materiálů (houževnatost, dobré tribologické charakteristiky, odolnost proti chemickým vlivům a pod.). Na začátku této práce v teoretické části budou čtenáři seznámeni s funkčními vrstvami, jejich použití v praxi, požadavky na ně kladenými a s materiály, které byly již dříve použity a jsou tedy pro dané použití (otěruvzdorné nástroje) vhodné. Dále bude provedena rešerše současných technologií svařování a navařování společně s poznatky o nástrojové oceli H13 a v neposlední řadě budou popsány základy tribologie. V experimentální části budou vytypovány vhodné materiály pro opravu funkčních vrstev s ohledem na zvýšenou otěruvzdornost a možnost práce za vysokých teplot. Dále bude provedeno navaření nových funkčních vrstev s následným proměření tvrdostí v různých stavech před a po tepelném zpracování. Budou provedeny tribologické experimenty zvolených materiálů za reálné, ale také zvýšené teploty. V neposlední řadě se bude diskutovat o naměřených hodnotách nejen tvrdosti, ale také koeficientu tření či míry opotřebení testovaných vzorků a vhodnosti zvolených materiálů.

2. Teoretická část

2.1. Funkční vrstvy

Vytvářením funkčních vrstev vznikají kompozity kombinující objemové vlastnosti základního materiálu se specifickými vlastnostmi přidaného materiálu. Jako funkční vrstvu je možno si představit jakýkoliv povrch součásti, který zajišťuje konkrétní funkci nebo jejich kombinaci. Ve strojírenském průmyslu se funkční vrstvy používají primárně jako mechanická ochrana původních součástí. [1,2,3]

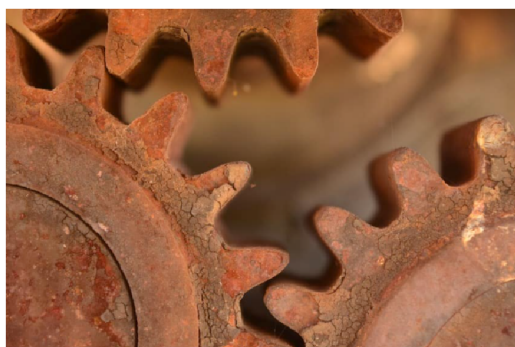
2.1.1. Způsoby opotřebení strojních součástí

Opotřebení strojní součástky se řadí mezi tzv. postupné poruchy, jež lze charakterizovat jako poruchy vlivem degračních procesů. Důsledkem je zhoršování počátečních vlastností povrchu v závislosti na čase opotřebení, tj. čím déle součástka pracuje, tím větší je riziko poruchy. Opotřebení je možné rozdělit na povrchové a vnitřní. Povrchové opotřebení je možné sledovat velmi snadno na rozměrech a kvalitě povrchu, zatímco strukturní změny uvnitř součásti vedoucí ke tvorbě trhlin je možné sledovat až po detailnějším rozboru. [1]

Mezi degrační procesy patří: koroze, abraze, adheze, eroze, kavitace, vibrační opotřebení a samotná únava materiálu

A) Koroze

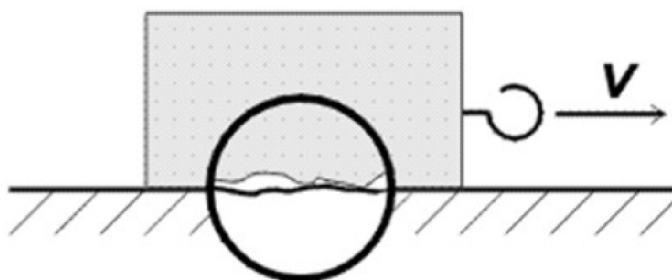
Koroze je definována jako interakce materiálu s prostředím za působení chemických nebo elektrochemických dějů, které mají za následek vznik korozních produktů, úbytek materiálu a změnu užitných vlastností materiálu (viz obr. 2.1). Chemická koroze probíhá v elektricky nevodivém prostředí mezi materiálem a prostředím (kapalina, plyn, sůl), jedná se především o oxidaci materiálu. Elektro-chemická koroze probíhá v elektrolytu, tedy ve vodivém prostředí za působení el. proudu. Reakce na anodě odpovídá oxidaci kovu, zatímco reakce na katodě odpovídá redukci oxidující složky roztoku (kyslík, ionty vodíku). [4]



Obr. 2.1 Zkorodované ozubení [5]

B) Abraze a Adheze

Pro definici abrazního a adhezního degradačního procesu je vhodné se nejprve seznámit s procesem tření, který má za následek právě tyto typy degradace. **Tření** je fyzikální jev vznikající při vzájemném pohybu dvou těles v těsném kontaktu. Jedná se o odpor proti směru pohybu součástky. Vzniká tzv. třecí síla, která je přímo úměrná normálovému zatížení součástky (směr kolmý k pohybu), nezávisí na velikosti stykových ploch těles a nezávisí na vzájemné rychlosti pohybu těles. Je zaveden tzv. koeficient tření číselně vyjadřující odpor těles z různých materiálů s různou drsností povrchu. Nerovnosti povrchů do sebe zapadají a tím brzdí pohyb (viz obr. 2.2).



Obr. 2.2 Tření dvou drsných povrchů [6]

Vzájemnou závislost mezi třecí a normálovou silou vyjadřuje následující vztah (1):

$$F_t = f * F_n \quad (1)$$

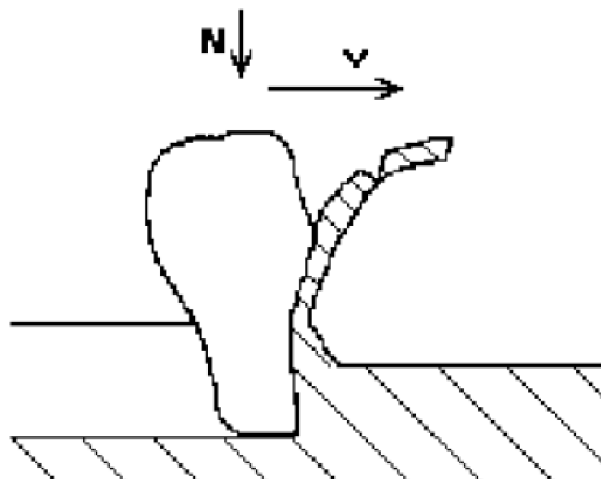
Kde:

| | |
|-------------------------|-------|
| F_t je třecí síla | [N] |
| F_n je Normálová síla | [N] |
| f je koeficient tření | [/] |

Proces tření je možno nalézt prakticky všude v běžném životě, ne vždy, se jedná o příčinu degradace materiálu, ale pouze o dočasné zamezení vzájemného pohybu dvou objektů. (chůze: bota – chodník). Negativním vlivem tření je postupný úbytek materiálu formou obrušování drsných povrchů součástky. [7,8]

Abraze

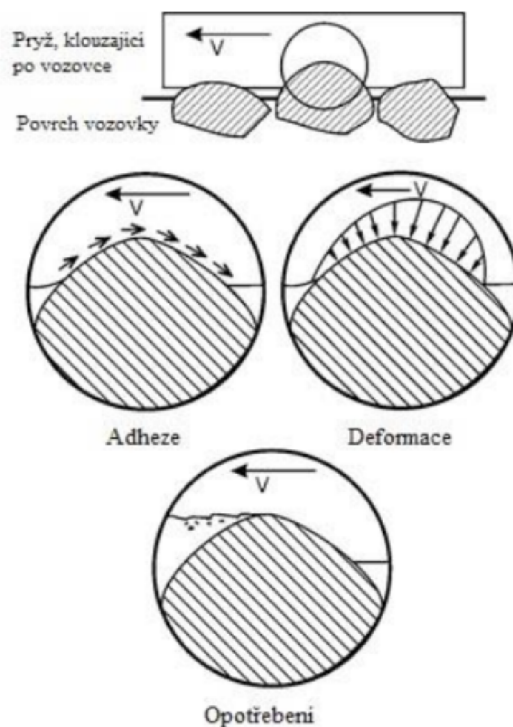
Jeden z nejintenzivnějších degradačních procesů, zapříčiněný vzájemným silovým působením velmi tvrdých, převážně minerálních částic. Následkem oddělení a přemístování částí materiálu. Příčinou je např. nedostatečné utěsnění funkčních povrchů a vniknutí tvrdé částičky do kluzné dvojice nebo vzájemné působení funkčních povrchů s rozdílnou tvrdostí. Čím vyšší bude provozní teplota, tím je materiál měkčí a oddělování částic probíhá rychleji. Tvrdé, abrazivní částice většinou minerálního charakteru mají vysokou tepelnou odolnost, a proto se rozdíl tvrdostí s teplotou značně mění. [9]



Obr. 2.3 Schéma abrazivního opotřebení [9]

Adheze

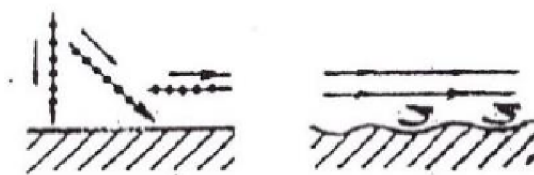
Adheze neboli “přilnavost” dvou povrchů je zapříčiněna drsností funkčních povrchů a třením mezi nimi, jejímž následkem může být zadření (viz obr. 2.4), až svaření za studena, což je často bráno i jako kladný způsob využití v adhezivních spojích. Aby se zadření či svaření předešlo, je vhodné využít dva různé materiály pro daný kontakt mezi součástmi stroje či udržovat podmínky, za kterých dané materiály netvoří slitiny. [10,11]



Obr. 2.4 Adhezní opotřebení demonstrováno na dvou rozdílných materiálech (pryž, asfalt) [12]

C) Eroze

Eroze je podobně jako abraze vyvolána účinkem velmi tvrdých, ale i měkčích částic, mění se pouze vnější podmínky procesu opotřebení. Částice nesené proudícím médiem v okolí součástky zapříčiňují rýhování a oddělování částic původního materiálu součástky (viz obr. 2.5). Pro toto opotřebení je typické nerovnoměrné opotřebení původního materiálu. Erozi lze využít i kladným způsobem a to např. řezáním vzduchem či vodním paprskem nebo časté úpravy povrchu jako je kuličkování. [13]



Obr. 2.5 Eroze zapříčiněná proudícím médiem [13]

E) Kavítace

Proces tzv. Kavítace vzniká v okolí součástek v kapalném prostředí. Při porušení kompaktnosti kapaliny vznikají a zanikají dutiny či bubliny par nebo plynů rozpuštěných v kapalině s tlakem nasycených par při aktuální teplotě (viz obr. 2.6a). Kompaktnost kapaliny může být porušena náhlou lokální změnou rychlosti kapaliny, což je známo jako hydrodynamická kavítace nebo náhlou poruchou akustické vlny v periodách zředění (nízký tlak), nazývanou jako Akustická kavítace (kavitační bublinky). Oba druhy kavítace mají za následek kavitační opotřebení zapříčiněné rázovou vlnou, která vzniká právě při kavitačních procesech a má za následek destrukci materiálu ve formě lokálních poruch (viz obr. 2.6b). [14,15]



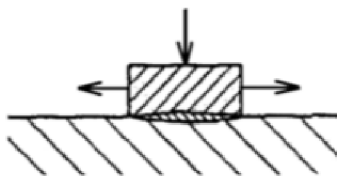
Obr. 2.6a Vznik kavitačních činitelů [16]



Obr. 2.6b Následek kavítace [17]

F) Vibrace

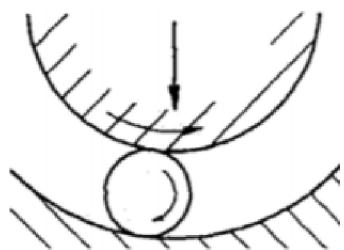
Vibrační opotřebenění lze nelézt i u zdánlivě nepohyblivých spojení jako jsou šroubové nebo lisované spoje, primárně se však nachází v hybných uloženích, jako jsou ložiska či čepy. Podmínkou pro působení vibračního opotřebenění je tangenciální pohyb součástí s normálovým zatížením (viz obr. 2.7). Při procesu se zvyšuje teplota a vzniká tzv. třecí koroze na třecí ploše součástí. Koroze má za následek vznik korozních produktů, které při vibracích tvoří důlky a trhliny v materiálu. Ty se následně stávají koncentrátory napětí. Na vibrační opotřebenění má vliv amplituda, frekvence a měrný tlak vibračního pohybu, ale také počet cyklů a pracovní prostředí. [18,19]



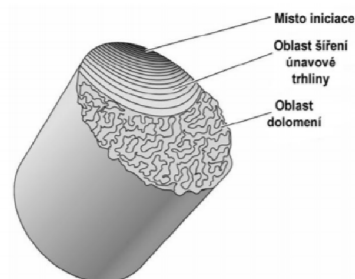
Obr. 2.7 Periodický pohyb vibračního opotřebenění [19]

G) Únava materiálu

Únavové opotřebenění lze pochopit jako kumulaci drobných opotřebenění při střídavém cyklickém namáhání součástky (viz obr.2.8a). Myšlený je např. valivý pohyb a vzájemné narážení dvou různých povrchů. Kvůli špatným povrchovým vlastnostem minimálně jedné součástky vznikají důlky, které se vlivem cyklů množí a vzájemně se propojují (vznik trhlin). Trhliny mají za následek drolení materiálu, až náhlé porušení celé součástky (únavový lom (viz obr.2.8b)). [20]



Obr. 2.8a Mechanismus únavového opotřebenění(ložisko) [21]



Obr. 2.8b Únavový lom [22]

2.1.2 Požadavky na funkční vrstvy

Jako požadavek na funkční vrstvu je možno si představit odolnost vůči konkrétnímu namáhání tedy dobré mechanické vlastnosti, vizuální představu dané součástky, ekologickou náročnost pro výrobu a likvidaci nebo také velmi důležitou ekonomickou náročnost. Cílem je tedy vyrobit součástku z recyklovatelného materiálu s co nejlepšími vizuálními, a hlavně mechanickými vlastnostmi za co nejnižší cenu.

Mechanické požadavky (odolnosti)

Mechanické vlastnosti každé součástky jsou dány především zvoleným materiálem a následnou úpravou povrchu funkčních ploch. Záleží vždy na tom, jakou funkci konkrétní součástka plní a podle toho je třeba navrhnout materiál s danou odolností. To souvisí s konkrétními deformačními procesy viz. kapitola 2.1.1. Jako příklad je možno uvést kluzná ložiska, která budou mít vysoké požadavky na otěruvzdornost nebo třeba lodní šroub, který je neustále vystaven korozi a kavitaci. Různé odolnosti povrchu materiálu je možné docílit pomocí různých materiálů a jejich povrchových úprav.

A) Korozi-vzdornost

Základním parametrem pro korozi-vzdornost je chemické složení materiálu odolné proti vnějším chemickým vlivům. Ve strojírenství jsou pro tuto aplikaci nejčastěji použity korozi-vzdorné oceli s vysokým obsahem antikorozi-vních prvků jako je Cr – Chrom, Ni – Nikl, Mn – Mangan, Mo – Molybden či Cu – Měď. Dalším parametrem je jakost povrchu a s ní spojená plocha součástky. Čím menší plocha, tím menší prostor pro oxidaci kovů. Porušený povrch vždy oxiduje rychleji. [23]

B) Odolnost proti Erozi

Je schopnost materiálu odolávat nárazům částic proudícího média. Tzv. Erozivní otěr je závislý na kinetické energii, geometrickém tvaru, tvrdosti, úhlu dopadu částice a na erodovaném materiálu. Požadovaná vlastnost materiálu je tedy odolnost proti vniknutí cizího tělesa neboli tvrdost. Využívá se zde vysoké elasticity materiálu s heterogenní strukturou což splňují např. slitiny Fe-C (oceli a litiny). [24]

C) Otěruvzdornost

Odolnost vůči Abrazi a Adhezi je možno spojit do jedné podtřídy s názvem Otěruvzdornost, protože oba tyto degradační procesy, jak už bylo řečeno, zapříčiňuje tření (2.1.1). Adhezi je možno eliminovat jakostí povrchu, čím vyšší jakost tím menší riziko zadření a svaření za studena. Abrazi, a tedy odolnost funkčních povrchů proti vniknutí a poškození cizí částicí je možno snížit hlavně tvrdostí (odolnost proti vniknutí cizího tělesa) povrchu, ale také jeho jakostí (cizí částice se nemá o co zachytit). Otěr je pouze povrchové poškození a závisí na tvaru abrazivní částice, její tvrdosti a na velikosti měrného tlaku mezi částicí a funkční vrstvou. U ocelí závisí tvrdost na množství uhlíku, volbě legujících prvků a na tepelném zpracování materiálu. [25,26]

D) Odolnost proti Kavitaci

Schopnost materiálu odolávat kavitačním implozím. Je požadována vysoká tvrdost a odolnost proti plastické deformaci, zároveň je třeba použít materiál s vysokým pnutím v povrchové vrstvě (u ocelí je vhodná martenzitická struktura). [27]

E) Odolnost proti vibracím

Odolnost proti vibracím není plně dána mechanickými vlastnostmi materiálu, protože zde dochází k rychlé oxidaci povrchů a tím k abrazi korozních produktů, které jsou mnohdy tvrdší než základní materiál. Ke zlepšení odolnosti je zapotřebí zpevnit třecí povrch kalením nebo např. kuličkováním za studena. Další alternativou jsou povlaky nebo ochranné vrstvy korozivzdorných a tvrdých materiálů. [28]

F) Odolnost proti únavě materiálu

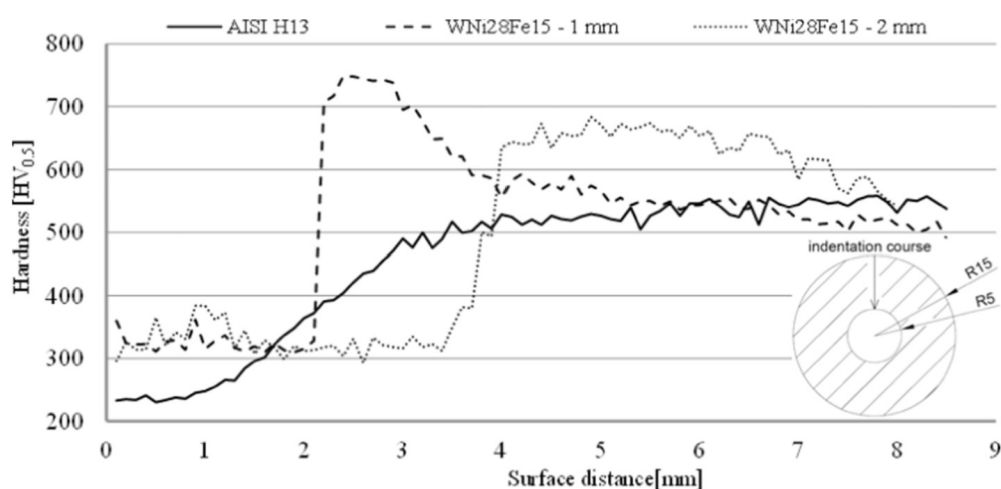
Schopnost materiálu být co nejdéle zatěžován cyklickým namáháním ve formě periody či sinusoidy. Požadavkem je tedy vysoká pružnost (elastická deformace), tak aby se co nejméně měnily vlastnosti materiálu. [29]

2.1.3. Rešerše materiálů návarových vrstev na ocel AISI H13

Byla provedena rešerše v oblasti návarových materiálů s ohledem na výslednou tvrdost a s tím související ořezuvzdornost. Pro seznámení s jednotlivými výzkumy byly uvedeny podmínky, za jakých byly dosaženy nejlepší výsledky. Bohužel výzkumů ohledně navařování na ocel H13 s relevantními zdroji bylo nalezeno jen velmi málo a vybrány byly, s ohledem na zaměření této bakalářské práce, pouze níže uvedené tři.

Návary ze slitiny wolframu

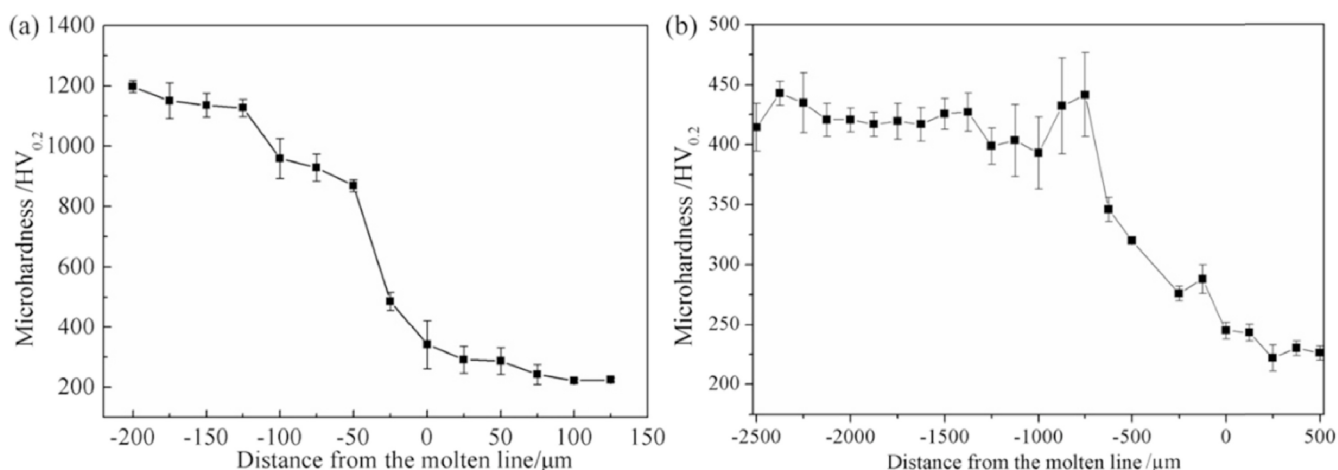
Studie z roku 2016 ze Slovinské laboratoře svařování Fakulty strojního inženýrství Univerzity Ljubljana a tým ve složení Andrej Skumavc, Janez Tušek, Aleš Nagode, Damjan Klobčar se zabývá navařováním a tepelnou únavou Wolframové slitiny (W_{Ni28Fe15}) na oceli H13 za pomoci obloukového svařování s vysokofrekvenčním generátorem (20 kHz). Vzorek byl po navaření nové vrstvy cyklicky tepelně namáhán a jeho výsledná tvrdost byla přibližně o 100 HV_{0,5} vyšší než tvrdost původního materiálu a také lepší odolnost proti tepelné únavě což bylo cílem výzkumu. [30]



Graf Porovnání tvrdostí v závislosti na vzdálenosti od povrchu [30]

Návary na bázi slitin kobaltu

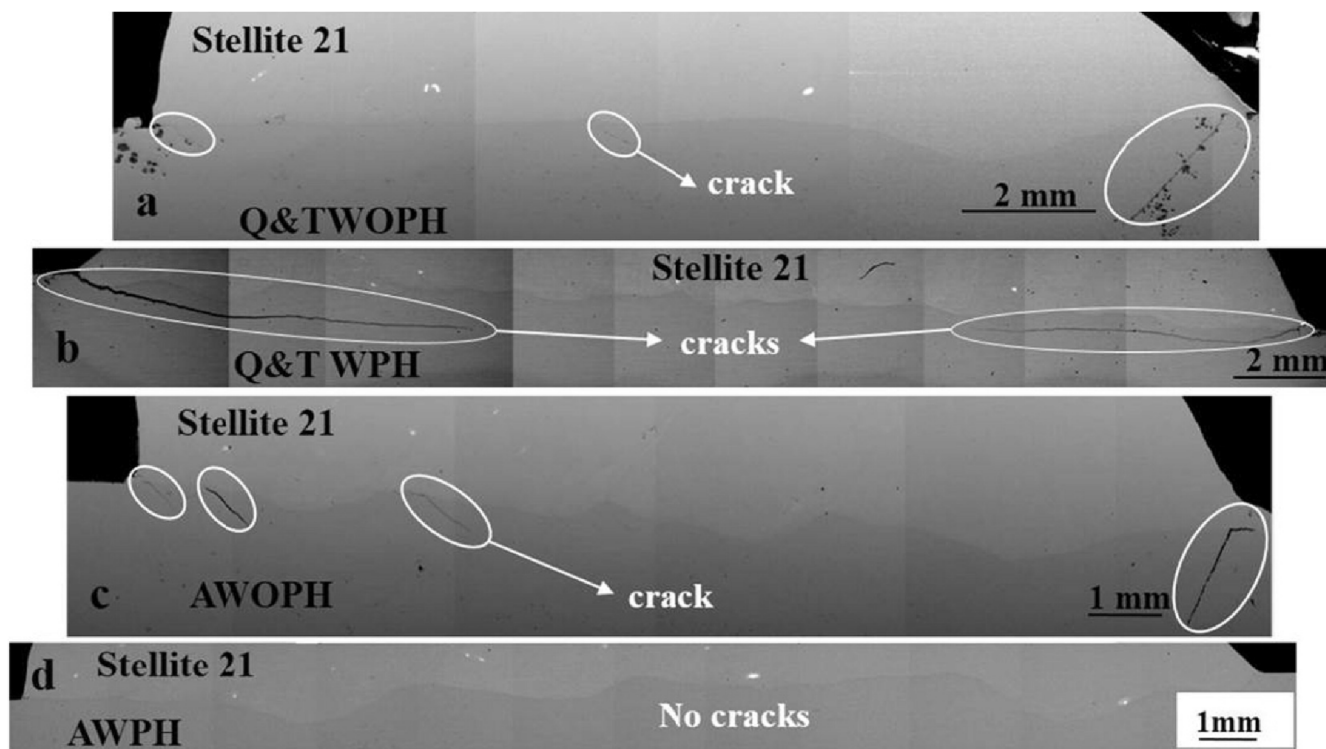
Na Shanghaiské univerzitě inženýrských věd v Číně byl v roce 2019 proveden výzkum k porovnání mikrostruktur a mechanických vlastností návarů slitin na bázi kobaltu za pomoci laseru a plazmy. Tým ve složení Jian Zhao, Qingwei Gao, Houqin Wang, Fengyuan Shu, Hongyun Zhao, Wenxiong He a Zhishui Yu použil samotavicí prášek Fco-06 s velikostí zrna 100-250 μm . Za pomoci laseru byla vytvořena vrstva amorfni fáze s naměřenou hodnotou tvrdosti až okolo 1200 $\text{HV}_{0,2}$, jak je zřejmé z obrázku Xa). To je téměř šestinásobek tvrdosti základního materiálu. Procesní parametry laseru byly: rychlost „skenování“ 100 mm/min, průměr laserové skvrny 2,2-2,5 mm, laserové rozostření 20 mm, tloušťka laserového plátování 200 μm a výkon laseru 467 W. Pomocí plazmy byl vytvořen návar při parametrech: proud 60-65 A, napětí 48 V, přísun plazmového plynu (Ar) 3,5 L/min, průtok prášku 23,8-25,6 g/min, práškový přívod plynu (Ar) 5-6 L/min, rychlost svařování 100 mm/min. Vznikl návar o maximální hodnotě tvrdost 450 $\text{HV}_{0,2}$ jak je zřejmé z obrázku Xb. [31]



Graf Porovnání mikrotvrdostí při navařování a) laserem b) plasmou [31]

Návary kobaltovou slitinou Stellite 21

V roce 2017 se tým z Indické instituce Madras (Rajeev G. P., Kamaraj M., Srinivasa R. Bakshi) zabýval navařováním stelliteových vrstev na ocel H13 za pomoci metody CMT (cold metal transfer welding). Nejlepších výsledků tým dosáhl při navařování na žíhaný povrch s předehřevem na 400 °C, proudem 9,1 V a napětím 126 A. Po navaření nebyly zaznamenány žádné poruchy (trhliny) na rozdíl od pokusů bez předehřevu nebo při pokusu s kaleným povrchem. Maximální tvrdost navařené stelliteové vrstvy dosahuje téměř 700 HV_{0,5}. [32]



Obr. Snímky příčných řezů povlaků z elektronového mikroskopu a) kaleno a temperováno bez předehřev b) kaleno a temperováno s předehřevem c) žíháno bez předehřevu d) žíháno s předehřevem [32]

2.2. Navařování

Navařování je nanášení nového materiálu (návaru) na povrch základního materiálu (substrátu) za použití metod podobných či stejných jako u svařování. Významnou výhodou je možnost opravy již opotřebovaných povrchů, a to jak pro celé plochy, tak pro lokální opotřebení.

Pro navařování nového materiálu je vhodné využít podskupiny tzv. tavných metod svařování, a to konkrétně svařování plamenem, plazmou či laserem, nejvhodnější je ale využití elektrického oblouku nebo tzv. obloukového svařování, do kterého se řadí metody svařování obalenou elektrodou, svařování pod tavidlem, MIG, MAG a (později v experimentální části využita) metoda TIG. Navařením nové funkční vrstvy na nástroj je možné výrazně změnit původní vlastnosti základního materiálu např. navařením stelitové destičky na nůž z nástrojové oceli.

Problematika heterogenních návarů

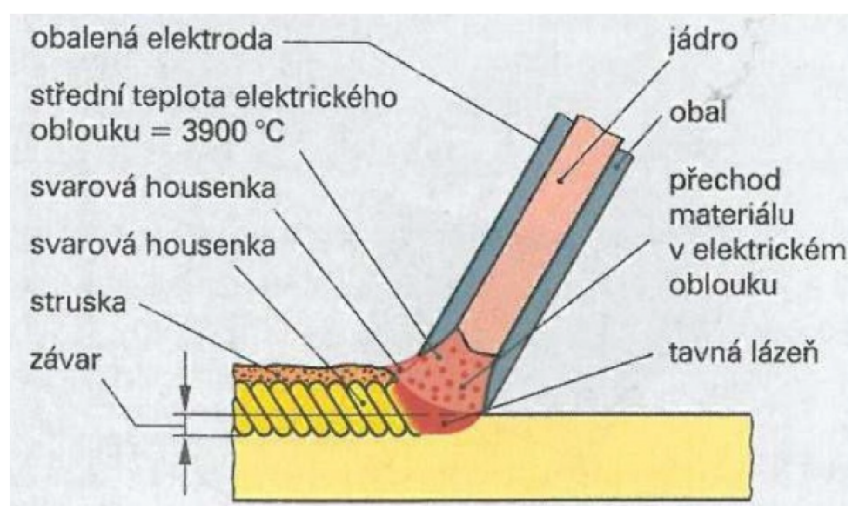
Při navařování odlišného materiálu tedy svařování dvou různých (heterogenních) materiálů tavným způsobem, dochází ke vzájemnému promíšení obou materiálů a vzniká tzv. heterogenní svar. oblast promísení. V této oblasti se kombinují vlastnosti obou svařovaných materiálů a při volbě nevhodných materiálů tato oblast degraduje. Cílem při navařování požadované funkční vrstvy je co nejméně ovlivnit oba původní materiály, to ale platí pouze u svařování dvou odlišných materiálů, kdy by jejich promísení mělo špatný vliv na finální produkt. Je tedy potřeba zvolit vhodný materiál tak aby výsledný svar vyhovoval požadovaným vlastnostem a po promísení nepraskal. V případě svařování dvou podobných materiálů, nemá promísení větší vliv na kvalitu spoje, a proto může být tato oblast větší. [33]

2.2.1. Metody obloukového svařování

Použitím tepla od elektrického oblouku se natavují styčné plochy základního a přídavného materiálu a tím dochází k jejich promísení a po vychladnutí k nerozebíratelnému spojení. Pro tvorbu návarů jsou využívány různé metody tavného svařování.

A) Svařování obalenou elektrodou

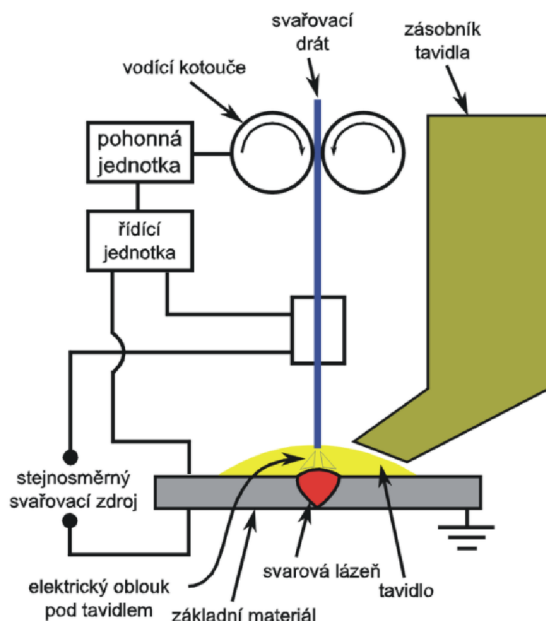
Pro tuto metodu je charakteristická kovová odtavující se elektroda se speciálním obalem, který má metalografickou, plynotvornou a ionizační funkci a tvoří ochranou strusku, kterou je po ochlazení třeba odstranit. Elektrický oblouk hoří mezi svarovou lázní a obalenou elektrodou. Podle typu obalu elektrod a svařovaného materiálu se volí typ použitého svařovacího proudu (stejnsměrný či střídavý) i polarita. Schematické znázornění svařování obalenou elektrodou je ukázáno na obr. 2.14. [34]



Obr. 2.14 Schéma metody svařování obalenou elektrodou [34]

B) Svařování pod tavidlem SAW (Submerged Arc Welding)

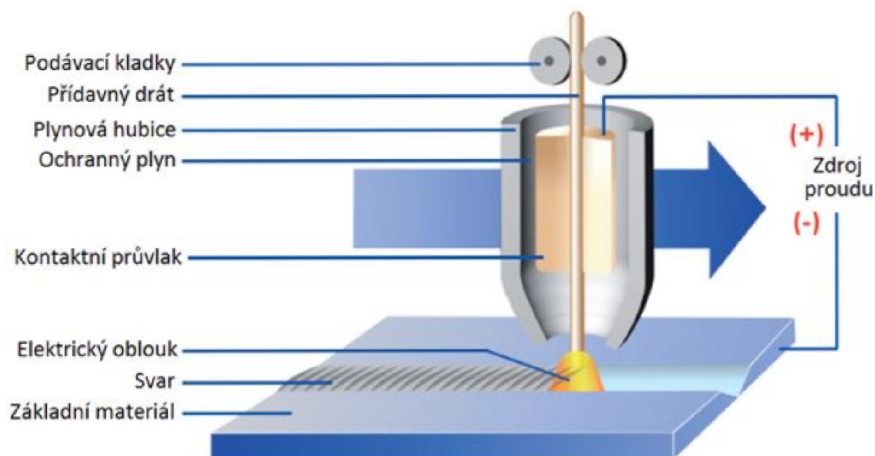
Metoda SAW (viz obr.2.15) je v podstatě svařování elektrickým obloukem s tavicí se elektrodou ve formě drátu, který je pomocí kladek podávacího zařízení dodáván do místa svařování. Celé svařování probíhá pod vrstvou tavidla ve formě prášku, proto “pod tavidlem”. Ochranná svarová lázeň je chráněna před přístupem vzduchu a ani el. oblouk není při svařování vidět, to zajišťuje minimální emise dýmů a záření. [35]



Obr. 2.15 Schéma metody svařování pod tavidlem [36]

C) Metody MIG (Metal Inert Gas) a MAG (Metal Active Gas)

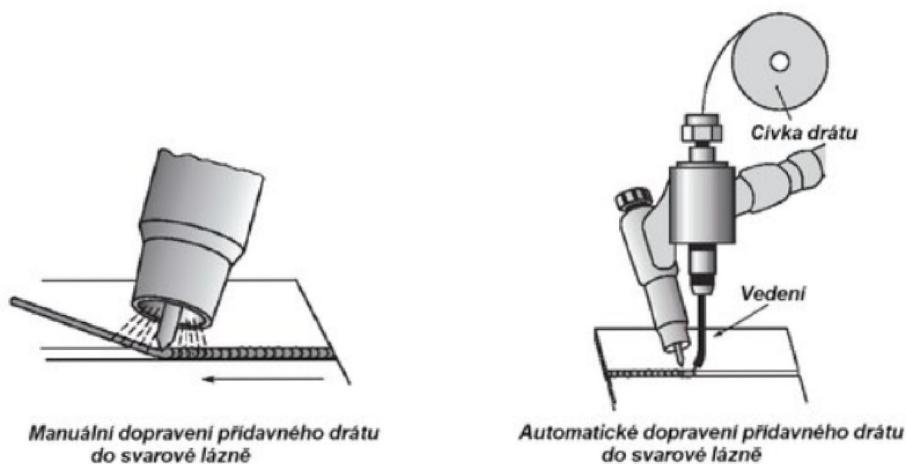
Tyto metody lze zahrnout do skupiny svařování v ochranné atmosféře. Ochranné ve smyslu zamezení přístupu okolní atmosféry do svarové lázně. U metody MIG má tedy inertní plyn pouze funkci ochrany, zatímco aktivní plyn u metody MAG se aktivně podílí na metalurgických reakcích. Princip obou metod je až na různorodost plynu naprosto stejný. Elektrický oblouk hoří mezi svarovou lázní a postupně se odtavující elektrodou dodávanou podavačem do místa svaru ve formě drátu (viz obr. 2.16). [37]



Obr. 2.16 Schéma metody svařování MIG a MAG (za použití aktivního plynu) [38]

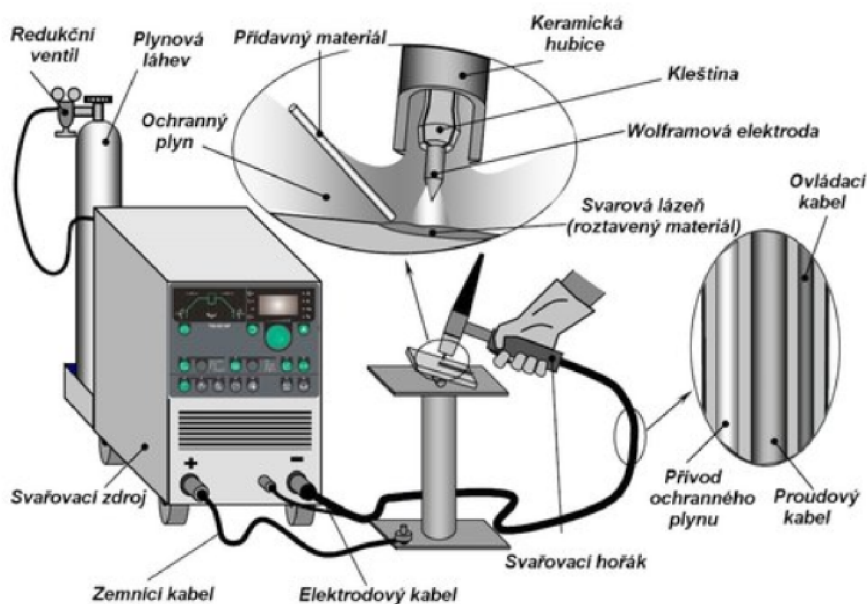
2.2.2. Metoda svařování TIG

Metoda TIG neboli Tungsten Inert Gas někdy známá jako metoda WIG kvůli překladu z němčiny Wolfram = Tungsten. Jedná se o svařování netavicí se wolframovou elektrodou v ochranném inertním plynu. Přidavný materiál neboli zde “studený drát” je podáván buďto ručně (viz obr. 2.17a) nebo mechanicky (viz obr. 2.17b).



Obr. 2.17a Manuální podávání materiálu [39] Obr. 2.17b Mechanické podávání materiálu [39]

TIG (viz obr. 2.18) je jedna z nejkompexnějších metod svařování hlavně díky možnosti svařování širokého portfolia materiálů a díky wolframu je možnost pracovat za velmi vysokých teplot, kterých u ostatních metod není možno dosáhnout. Je možné použít střídavý i stejnosměrný el. proud. Inertním plynem je zajištěna vysoká ochrana před vstupem nečistot do svaru a integrovaným přísunem přídavného materiálu je zajištěna plná kontrola nad tvarem svarové lázně a výsledného svaru. Precizní tvorba svarů je kompenzována produktivitou práce a značnou finanční náročností na pořízení často velice složitých svářecích zařízení.



Obr. 2.18 Svářecí zařízení metody TIG [39]

U metoda TIG, dále využitě v experimentální části, je potřeba udržovat vhodné pracovní podmínky i malý poryv větru může ovlivnit ochrannou atmosféru. Při vhodných pracovních podmínkách je ideální pro složité svary, proto je využita např. při svařování variabilních konstrukcí (ochranné prvky off-road automobilů, rámy kol a motocyklů). V neposlední řadě se TIG využívá na svařování speciálních materiálů a heterogenních svarů (hliníkové materiály, titan, měď, bronz, hořčík nebo vysoce legované a nástrojové oceli. Nevýhodou je nízká produktivita práce. [39,40]

2.3. Oceli AISI H13

Nástrojové oceli AISI H13 (X40CrMoV5-1 – značení dle ČSN EN 10027-1 a 1.2344 – značení dle ČSN EN 10027-2) jsou známé jako chromové oceli určené pro nástroje pracující za vysokých teplot. Oceli H13 jsou hojně využívány jak pro práci za tepla, tak i za studena. Z těchto ocelí se vyrábí také formy pro tlakové lití a protlačování neželezných kovů či plastů, nože pro stříhání za tepla nebo malé a střední zápustky. Důvodem takto hojného využití je výborná pevnost, tvrdost a ořezavost při nízkých i vysokých teplotách. Díky vysokému obsahu legur má horší tepelnou vodivost a díky vysokému obsahu uhlíku lepší prokalitelnost při tepelném zpracování. Tyto oceli se oproti ostatním také dobře obrábí a leští. Díky dobré ořezavosti se ale špatně brousí. V následujících tabulkách (Tab. 2.2–2.4) budou postupně uvedeny chemické, fyzikální a mechanické vlastnosti udávané firmou Lkalloy (jeden z předních dodavatelů ocelí H13). [41,42,42,44]

Tab. 2.2 Chemické složení Oceli AISI H13

| Prvek | C | Cr | Mn | Mo | V | Si | Fe |
|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Množství [%] | 0,32 - 0,45 | 4,75 - 5,50 | 0,20 - 0,60 | 1,10 - 1,75 | 0,80 - 1,20 | 0,80 - 1,25 | Zůstatek |

Tab. 2.3 Fyzikální vlastnosti oceli AISI H13

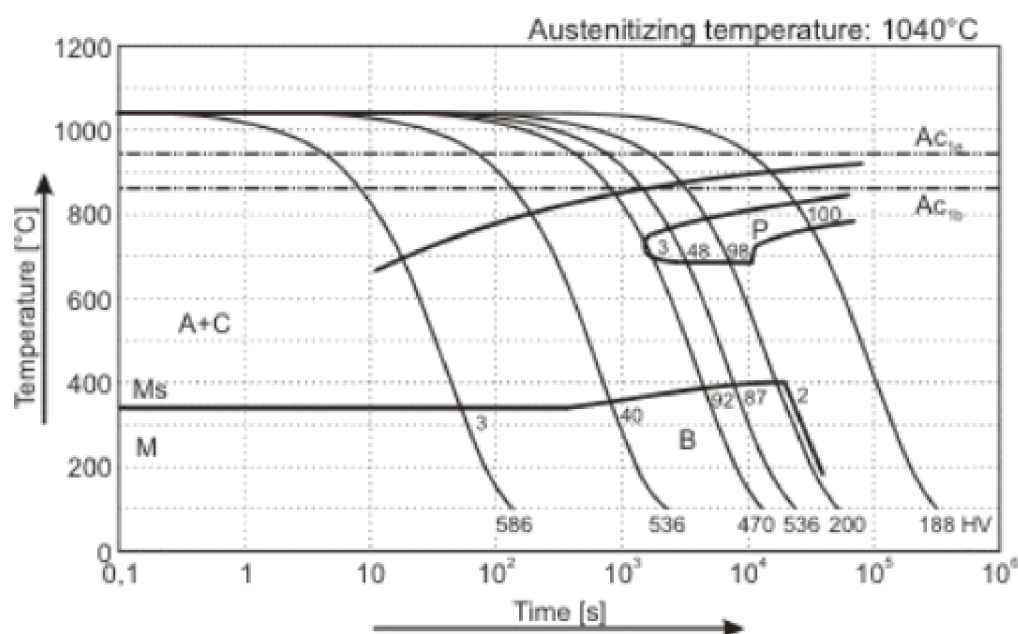
| Veličina | Hodnota |
|---|----------------------|
| Hustota [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$] | 7800 |
| Součinitel tepelné vodivosti [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$] | 28,6 |
| Teplota tání [$^{\circ}\text{C}$] | 1427 |
| Součinitel teplotní objemové roztažnosti [K^{-1}] | $10,4 \cdot 10^{-6}$ |

Tab. 2.4 Mechanické vlastnosti oceli AISI H13

| Vlastnosti | Hodnoty |
|-----------------------------|---------------|
| Mez pevnosti v tahu (20 °C) | 1200-1590 MPa |
| Mez úměrnosti (20 °C) | 1000-1380 MPa |
| Zmenšení plochy | 50 % |
| Modul pružnosti E | 215 GPa |
| Poisionův poměr | 0,27-0,30 |

Strukturní změny při ochlazování

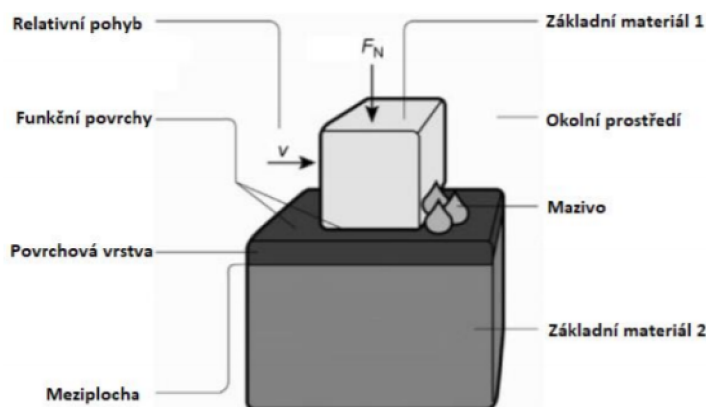
Strukturní změny tepelně zpracované oceli jsou zaznamenávány v diagramech, které jsou rozděleny dle způsobu ochlazování materiálu. Nejčastěji používaný je tzv. ARA (CCT) diagram znázorňující anizotermický rozpad austenitu, tedy za postupně se snižující teploty. Výsledné struktury se tvoří v závislosti na rychlosti ochlazování (bainit, martenzit, perlit). Pro ocel AISI H13 vypadá ARA diagram následovně (viz obr 2.19). [45]



Obr. 2.19 ARA Diagram oceli AISI H13

2.4. Tribologie

Tribologie je vědní obor zabývající se třením, opotřebením a mazáním (viz obr.2.20) při vzájemném relativním pohybu nebo při pokusu o vzájemný pohyb dvou funkčních povrchů. Myšlený je pohyb kluzný, valivý, kmitavý a nárazový. Je zaveden pojem tzv. Tribologického systému, který vyjadřuje dva konkrétní členy a jejich styčné plochy, případně látku nacházející se mezi členy a jejich blízké okolí. Existují dva druhy tribologického systému – přírodní tribologický systém, do kterého je možné zařadit např. kloubové spojení končetin v lidském těle, a umělý tribologický systém, ten je vytvořen člověkem pro ulehčení lidské práce a podobně. Cílem tribologie je změřit a následně idealizovat právě vzájemný pohyb dvou funkčních ploch, využívá se tedy především maziva pro docílení co nejmenšího koeficientu tření. Ne vždy je minimální tření požadováno, v některých aplikacích je dokonce vysoké tření požadováno. [46]

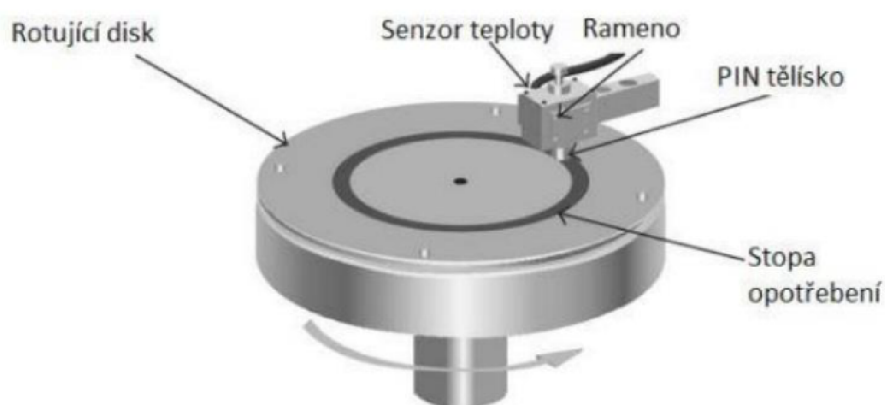


Obr. 2.20 Schéma tribologického systému [46]

Tribologie je v dnešní době velmi vážený obor. Na základě tribologických zkoušek jsou vybírány vhodné materiály na výrobu a opravu strojních součástí čímž je značně sníženo opotřebením strojních součástí a tím výrazně sníženy finanční náklady na údržbu a chod strojů. Stroje samotné jsou čím dál komplikovanější a požadavky na ně čím dál vyšší, proto je kladen velký důraz na tribologické vlastnosti nejen při opravách a už při jejich navrhování a konstrukci.

Ball-on-Disc

Metoda Ball-on-Disc podle normy ASTM G99 je jedna z nejvyžívanějších tribologických zkoušek. Zkušební materiál je umístěn na rotačním kotouči, který se otáčí definovanou rychlostí. Do vzorku je definovanou silou vlačován hrot nebo kulička definovaného průměru, tím se na testovaném vzorku vytvoří tzv. tribologická stopa (viz obr. 2.21). Hledaným údajem tribologické zkoušky je časový průběh koeficientu tření v závislosti na počtu rotačních cyklů. Dále je zkoumána stopa opotřebení na zkušebním vzorku a opotřebení zkušební kuličky. Vše je měřeno s ohledem na okolní prostředí tzn. s ohledem na vlhkost, teplotu a případnou mazací látku. Při měření je nezbytné odvádět vytvořené teplo tak, aby dále neovlivňovalo výsledky, toho lze docílit správnou volbou rotačního poloměru. [47,48]



Obr. 2.21 Metoda Ball-on-Disc [49]

3. Experimentální část

Experimentální část bakalářské práce se zabývá nejprve volbou návarového materiálu, a to podle požadovaných tribologických vlastností, mechanických vlastností, využití (za zvýšených teplot) či vhodnosti svařování s ocelí AISI H13 a následným posouzením nově vytvořených funkčních vrstev za pomoci tvrdoměru Qness Q30A zkouška dle Vickerse (HV 10). Na vzorcích bude měřena tvrdost, protože je předpokladem dobrých tribologických vlastností. Cílem je tedy vytvořit funkční vrstvy dvou zvolených materiálů a následně posoudit jejich tribologickou odolnost za různých podmínek okolní teploty.

Navařování funkčních vrstev

Pro navaření nové funkční vrstvy byla použita metoda TIG (viz 2.2.2) a přídavný materiál ve formě tyčí o průměru 2,4 mm a délce 50 cm byl do místa navařování podáván ručně.

3.1. Volba návarového materiálu

Přídavný materiál pro vytvoření nové funkční vrstvy byt vytipován podle užitečných vlastností s možností následné povrchové úpravy. Byl hledán materiál se zvýšenou otěruvzdorností za vysokých teplot a možností následného chromování či nitridace, která má za následek další zvýšení odolnosti proti opotřebení. Dále bylo přihlíženo na dílčí požadavky při navařování daného materiálu, jako je přehřev, či následný dohřev.

Za těchto předpokladů byly vytipovány dva materiály, Cronitex Rc 44 a Cronitex Rc 52.

Charakteristika materiálu Cronitex Rc 44

Jedná se o středně legovaný CrMoV svařovací materiál vyznačující se dobrou tvrdostí za tepla a odolností proti trhlinám. Je velmi málo citlivý vůči teplotním změnám, a to až do teploty 550°C. Materiál lze kalit na vzduchu, nitridovat a za určitých podmínek i chromovat.

Mechanické parametry materiálu Cronitex Rc 44

- Tvrdost po navaření: 44 – 46 HRc
- Tvrdost po žihání naměkko: 235 HB
- Tvrdost po kalení: 59 – 61 HRc
- Tvrdost po popouštění: 50 – 55 HRc

Návarový materiál Cronitex Rc 44 byl vybrán s ohledem na vhodnost využití, a to konkrétně práci za tepla. Dále pro jeho dobrou odolnost proti trhlinám a zaručenou schopnost nitridace, která maximalizuje otěruvzdornost navařené vrstvy. Nevýhodou materiálu Cronitex Rc 44 je potřeba předehřevu základního materiálu na 300 – 400°C. Tento materiál je možné dále využít na formy na tlakové lití hliníku, na válce a písty, lisovací nástroje a lisovací či děrovací trny chlazené olejem nebo vzduchem. [50]

Charakteristika materiálu Cronitex Rc 52

Jedná se o vysoce legovaný svářovací materiál NiCoMo, tvořící martenzitický kov vyznačující se odolností proti trhlinám a houževnatostí i přes vysokou tvrdost. Lze jej relativně dobře obrábět a má stabilní hrany až do provozních teplot nad 400°C a velmi vysokou životnost.

Mechanické parametry materiálu Cronitex Rc 52

- Tvrdost po navaření: 30 – 36 HRc
- Tvrdost při předehřevu na 250 – 300°C: 28 – 32 HRc
- Tvrdost po tepelném zpracování: 48 – 54 HRc

Návarový materiál Cronitex Rc 52 byl vybrán s ohledem na svou vysokou tvrdost při současně dostatečné houževnatosti, odolnosti proti trhlinám a možnosti navařování bez předehřevu základního materiálu. Slitina poskytuje vysoce kvalitní svarový kov pro návary na silně namáhané lisovací, tažné, razící a ostříhovací nástroje, břity pro práci za tepla, zápustky, nástroje na tlakové lití hliníku, nože pro práci za studena a vystříhovací nástroje pro silný a odolný materiál. Dále pro vysoce namáhané kovací válce pro kontinuální lití či kanály forem na tlakové lití hliníku. Materiál nelze nitridovat, ani chromovat. [51]

3.2. Realizace navaření nových vrstev

Při experimentu byl návar materiálu Chronitex Rc 44 proveden ve 3 vrstvách, počet vrstev je vždy dán dostatečnou tloušťkou návaru. Materiál Chronitex Rc 44 je podobný materiálu základnímu a jejich vzájemné promíšení probíhá relativně snadno, proto je možné navařovat housenku rychleji. Díky rychlejšímu navařování se tvoří tenčí housenka, a proto je potřeba vytvořit více vrstev. Při navařování bylo použito menšího předehřevu, než je doporučený výrobcem (320 °C), protože se i za nižších teplot netvořily trhliny. Návar materiálu Cronitex Rc 52 proběhl pouze ve dvou vrstvách. Materiál je dosti odlišný od základního, jedná se tedy o heterogenní spoj. Promíšení probíhá hůře, a proto je potřeba delších časů navařování (pomalejší pohyb), čímž se vytvoří housenka o větší tloušťce. Předehřev u materiálu Chronitex Rc 52 se nedoporučuje, proto jsou v tabulce uvedeny teploty při realizaci navařování a ne předehřev. Parametry navařování (číslo housenky, použitý proud, délka housenky, čas navařování housenky, teplota předehřevu (procesní teplota u Rc 52)) byly sumarizovány v tabulce 3.1.

Tab. 3.1 Tabulka sumarizace použitých hodnot při navařování obou materiálů (Cronitex Rc 44 a Cronitex Rc 52).

| Vrstva housenek | Číslo housenky | Použitý proud (A) | Délka housenky (mm) | Čas navařování housenky (s) | Teplota předehřevu (°C) |
|---|---------------------|-------------------|---------------------|-----------------------------|-------------------------|
| Návarový materiál Cronitex Rc 44 | | | | | |
| Vrstva 1 | 1 | 120 | 40 | 22 | 190 |
| | 2 | 120 | 40 | 25 | 285 |
| | 3 | 120 | 40 | 25 | 360 |
| | 4 | 120 | 40 | 24 | 340 |
| | 5 | 120 | 40 | 26 | 260 |
| Vrstva 2 | 1 | 120 | 40 | 25 | 320 |
| | 2 | 120 | 40 | 23 | 320 |
| | 3 | 120 | 40 | 20 | 320 |
| Vrstva 3 | 1 | 120 | 40 | 24 | 350 |
| | 2 | 120 | 40 | 23 | 350 |
| Návarový materiál Cronitex Rc 52 | | | | | |
| Vrstva 1 | 1 | 100 | 38 | 43 | 20 |
| | 2 | 100 | 39 | 70 | 150 |
| | 3 | 100 | 39 | 76 | 190 |
| | 4 | 100 | 40 | 80 | 190 |
| | 5 | 100 | 40 | 78 | 190 |
| | 6 | 120 | 40 | 43 | 190 |
| | 7 | 120 | 40 | 60 | 190 |
| | 8 | 120 | 40 | 51 | 190 |
| Vrstva 2 | 1 (mezi 4. a 5.) | 120 | 36 | 45 | 185 |
| | 2 (mezi 5. a 6.) | 120 | 36 | 50 | 190 |
| | 3 (mezi 6. a 7.) | 120 | 36 | 60 | 180 |

Tvrдост nově navařených vrstev

Pro posouzení nově vytvořených vrstev byly naměřeny tvrdosti z tvrdoměru Qness Q30A, kde byla provedena zkouška dle Vickerse (HV 10) (viz obr. 3.2) a naměřeny hodnoty v přesně lokalizovaných dílčích místech pro porovnání původní, promísené a nové oblasti u materiálu Chronitex Rc 44 ve stavu po navaření, po zakalení a po zakalení a popouštění. U materiálu Chronitex Rc 52 ve stavu po navaření, po zakalení a po vytvrzení. (viz obr 3.3 – 3.8).

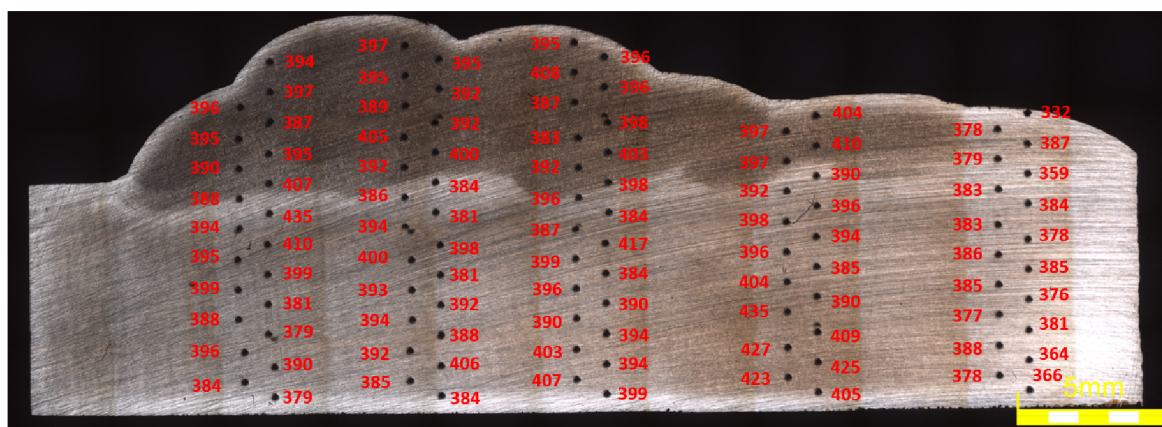


Obr. 3.2 Tvrdoměr Qness Q10, 30, 50A [52]

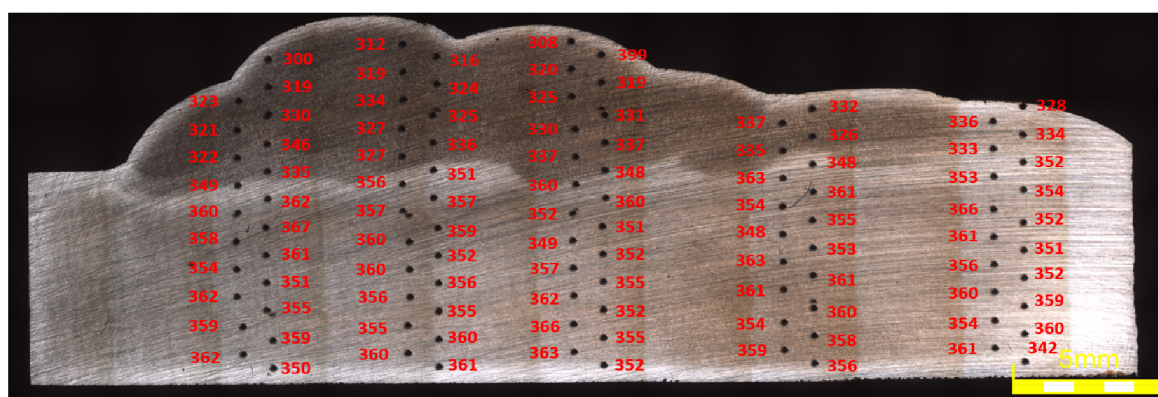
Naměřené tvrdosti (Cronitex Rc 44)



Obr. 3.3 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po navaření (Cronitex Rc 44) Teplota předehřevu při navařování: cca 320 °C

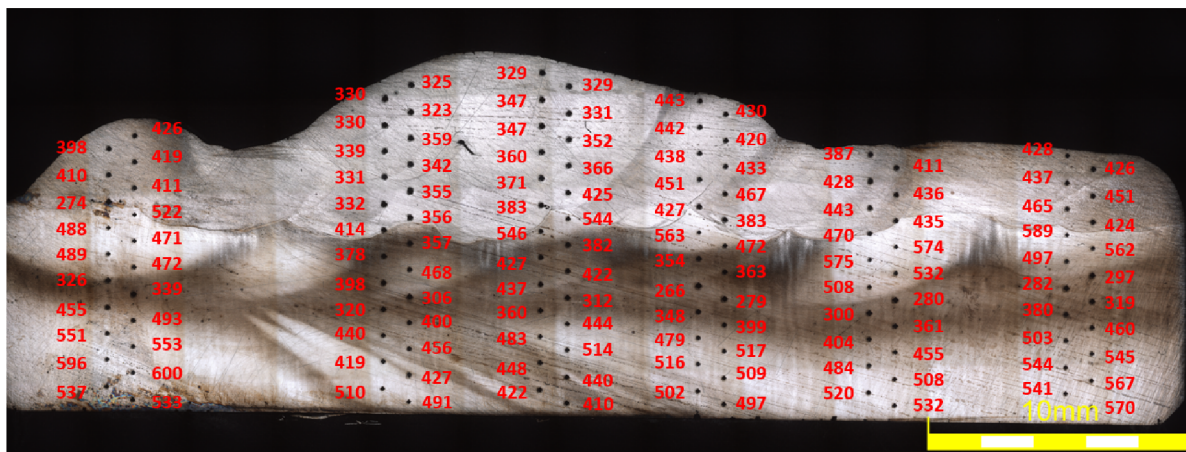


Obr. 3.4 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po zakalení (Cronitex Rc 44)
Kalení: austenitizace při 1050 °C s následným zchlazením do oleje

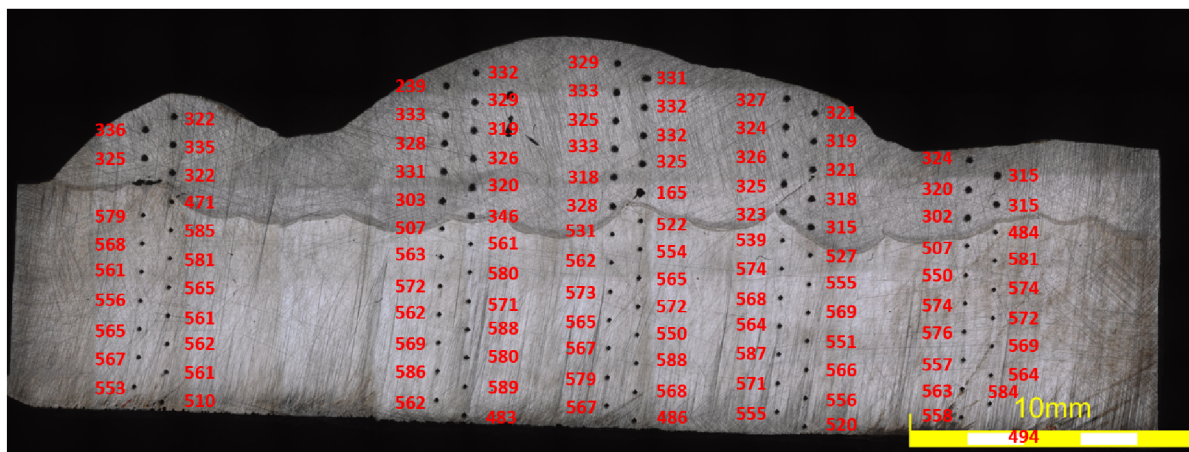


Obr. 3.5 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po zakalení a popouštění (Cronitex Rc 44) Popouštění: při teplotě 570 °C

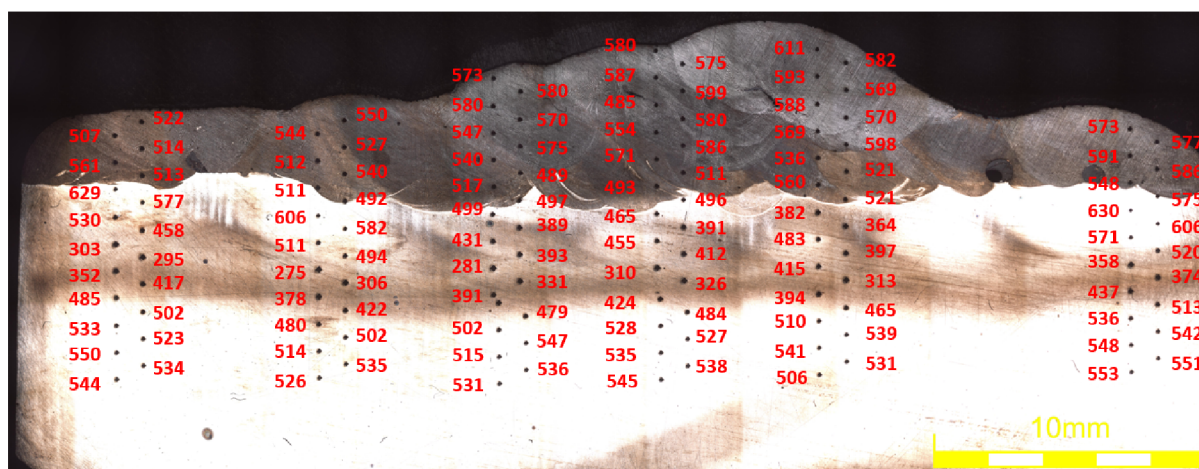
Naměřené tvrdosti (Cronitex Rc 52)



Obr. 3.6 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po navaření (Cronitex Rc 52) Teplota předehřevu při navařování: cca 180 °C



Obr. 3.7 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po zakalení (Cronitex Rc 52) Kalení: austenitizace při 1050 °C s následným zachlazením do oleje



Obr. 3.8 Naměřené tvrdosti v příčném řezu návaru – stav po vytvrzení (Cronitex Rc 52) Vytvrzení: při teplotě 480 °C po dobu 4 hodin s následným pomalým ochlazením v peci



Po naměření tvrdostí v dílčích bodech za různých tepelných úprav je možno porovnat tvrdosti návarových materiálů. Z měření je zřejmé, že jsou hodnoty tvrdosti převážně srovnatelné pro oba návarové materiály. Pro další experimenty byl však zvolen pouze materiál Cronitex Rc 44 a to kvůli možnosti následné nitridace, která má za následek výrazné zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy. Následující experiment (tribologická zkouška) byl proveden na vzorku s povrchovým návarem Cronitex Rc 44 ve stavu po navaření (H13 – nav – Rc 44) a na vzorku s povrchovým návarem Cronitex Rc 44 ve stavu po žihání na měkko a následné nitridaci (H13 – N – nav – Rc 44).

Plazmová nitridace

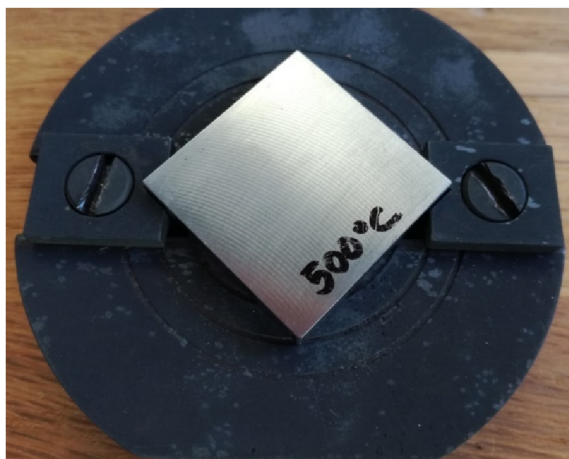
Jedná se o chemickotepelné zpracování za pomoci plazmatu, ke zvýšení tvrdosti povrchové vrstvy materiálu. Jedná se o vytvrzení povrchu nasycením dusíkem. Plazmová nitridace byl provedena v atmosféře s obsahem 75% vodíku a 25% dusíku při teplotě 480 °C a za její pomoci byla vytvořena povrchová vrstva o tloušťce 35 – 40 μm a tvrdosti okolo 1100 HV_{0,2}. Ocel AISI H13 je možno nitridovat pouze ve stavu po žihání na měkko, což má za následek o něco nižší tvrdost. Pro nitridaci povrchu oceli AISI H13 s návarem přídavného materiálu Cronitex Rc 44 bylo potřeba optimalizovat parametry, ty jsou uvedeny v tabulce 3.9.

Tab. 3.9 Optimalizované parametry nitridačního procesu

| | Čištění | Nitridace | Žihání v plazmě |
|---|---------|-----------|-----------------|
| Teplota [°C] | 420 | 540 | 540 |
| Čas [hod] | 3 | 25 | 5 |
| Poměr plynů N ₂ /H ₂ [l.min ⁻¹] | 0/3 | 5/1 | 0 |
| Proud [V] | 450 | 450 | 450 |
| Napětí [A] | 200 | 200 | 200 |

3.3. Hodnocení tribologických vlastností materiálu

Pro tribologické testování byly zkušební vzorky s návarem upraveny do tvaru kvádrů pro snadnější upnutí do testovacího stolečku. K tribologickým testům byl použit přístroj CETR UMI Multi-Specimen Test System (Obr. 3.10). Tribometr umožňuje měření za RT i za zvýšených teplot, v souladu s normou ASTM G99-95 - metoda ball-on-disc viz Obr. 3.11.



Obr. 3.10 Ukázka uchycení vzorku ke stolečku přístroje



Obr. 3.11 Přístroj CETR UMI Multi-Specimen Test System – Tribometr

Pro tribologickou zkoušku samotnou byla zvolena třecí dvojice: materiál zkoumaného vzorku a keramická kulička (Si_3N_4) o tvrdosti $<1600(\text{HV}10)$, teplotní odolnosti $<1300\text{ }^\circ\text{C}$ a měrné hmotnosti $3,21\text{ g/cm}^3$. Tato třecí dvojice byla během experimentu ve stálém kontaktu a testovací kulička byla v držáku upevněna tak aby bylo zamezeno možnosti otáčení. Vzájemný pohyb byl tedy pouze kluzné tření. Rovinný vzorek materiálu se otáčel rychlostí 60 rpm. Zatížení mezi kluznou dvojicí bylo 10 N.

Tribologický experiment

Před začátkem samotného měření byly oba dva materiály třecí dvojice upnuty do tribologického přístroje a pomocí příslušného softwaru byly nastaveny podmínky experimentu, jako je teplota, rychlost otáčení, zatížení či délka experimentu. Předehřátí pece trvalo 15-20 minut a samotný experiment pak 2 hodiny. Po ukončení experimentu bylo potřeba nechat komoru přístroje vychladnout, což trvalo další cca 2 hodiny. Materiály byly testovány za pokojové teploty (RT) a za zvýšené teploty – 300 °C, 400 °C a 500 °C. Použité parametry tribologického experimentu popsány v tabulce 3.12. Zkoumanými parametry byl třecí koeficient (vzorek - protikus), šířka a hloubka profilu opotřebení vzorku a míra opotřebení protikusu(keramická kulička (Si_3N_4)).

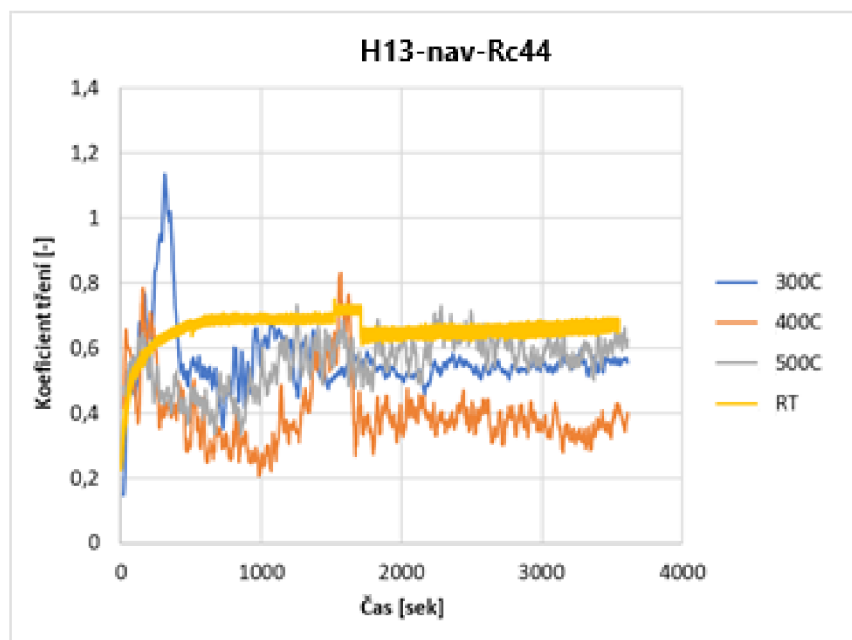
Tab. 3.12 Použité parametry pro tribologický experiment

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| materiál kuličky | keramika Si_3N_4 |
| materiál substrátu | H13-nav-Rc 44 , H13-N-nav-Rc 44 |
| zatížení | 10 N |
| průměr kuličky | 6 mm |
| rychlost otáčení | 60 rpm |
| ujetá dráha | 360 m |
| teplota vzduchu (RT) | 23,6 °C |
| vlhkost vzduchu | 36 ± 2 % |
| teplota během experimentu | RT, 300 °C, 400 °C, 500 °C |

Výsledky tribologického experimentu

Materiál H13-nav-Rc44

Následující graf 3.13 znázorňuje průběh koeficientu tření v čase a RT a za zvýšených teplot (300 °C, 400 °C a 500 °C).



Obr. 3.13 Průběhy koeficientu tření vzorku H13-nav-Rc44

Naměřené průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchylky jsou vypsány v tabulce 3.14.

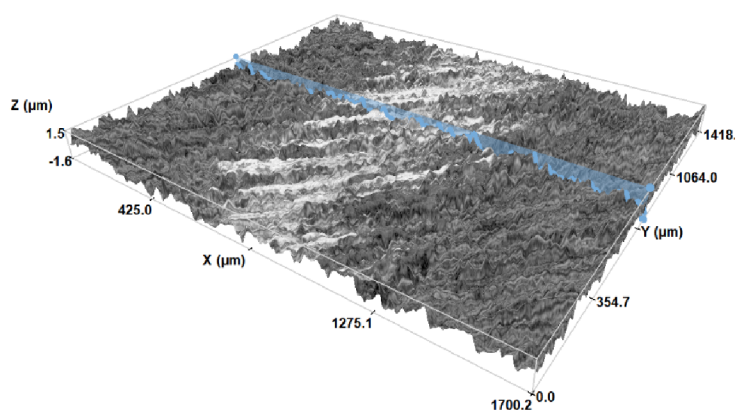
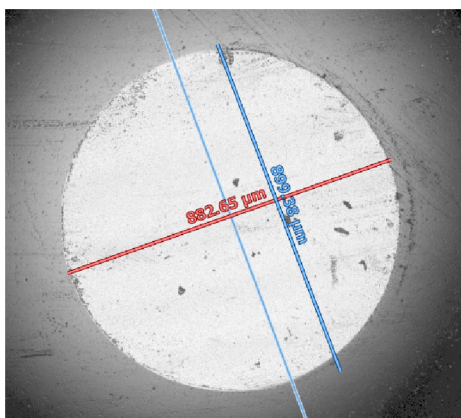
Tab. 3.14 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchylky u vzorku H13-nav-Rc44

| teplota [°C] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| třecí koeficient [-] | 0,658 | 0,561 | 0,399 | 0,558 |
| Směrod. odchylka | ± 0,087 | ± 0,117 | ± 0,153 | ± 0,146 |

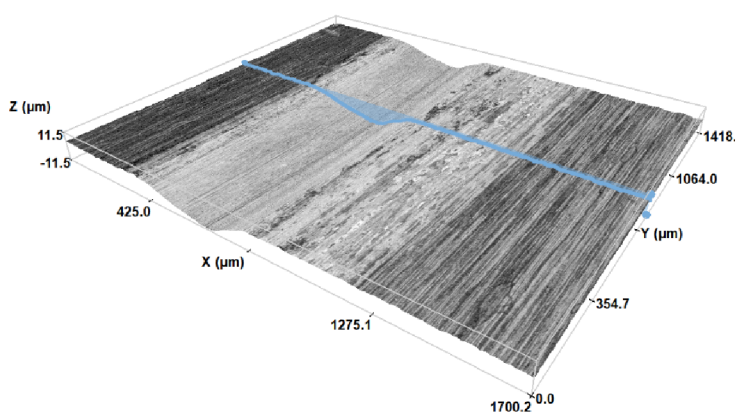
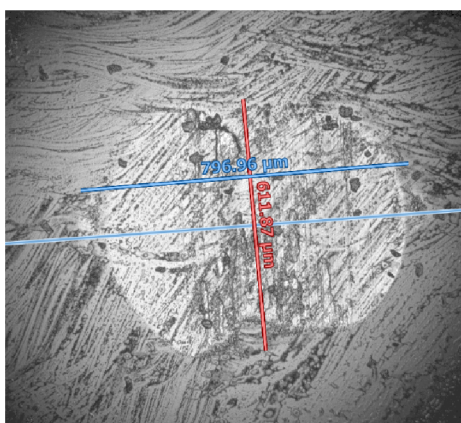
Hodnocení míry opotřebení

Následkem tribologického měření je deformační stopa na obou prvcích třecí dvojice, tato stopa byla použita pro vyhodnocení míry opotřebení. Deformace po kontaktu zkoumaného materiálu a keramické kuličky Si₃N₄ při tření na sucho, při RT a při zvýšené teplotě viz obr. 3.15.

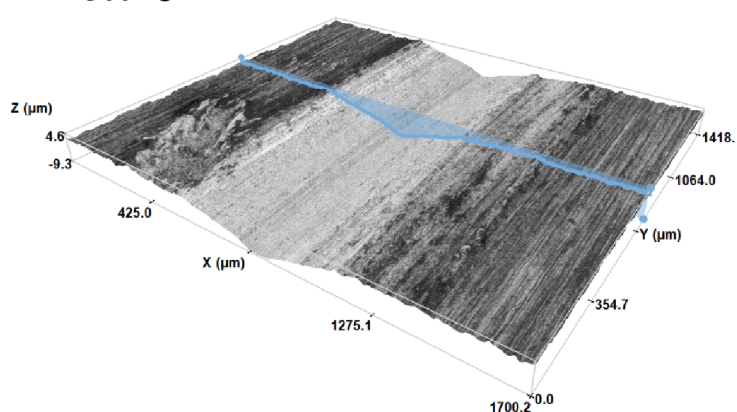
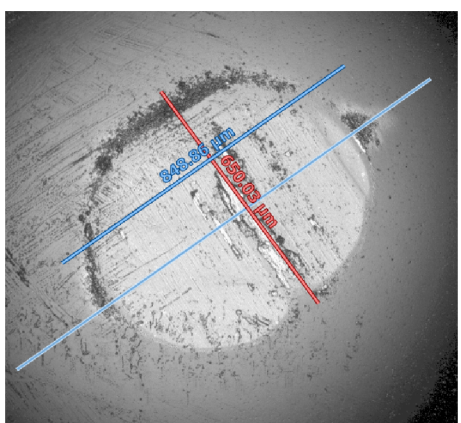
Byla zkoumána šířka a hloubka profilu opotřebení na zkoumaném vzorku a objemové opotřebení keramické kuličky.



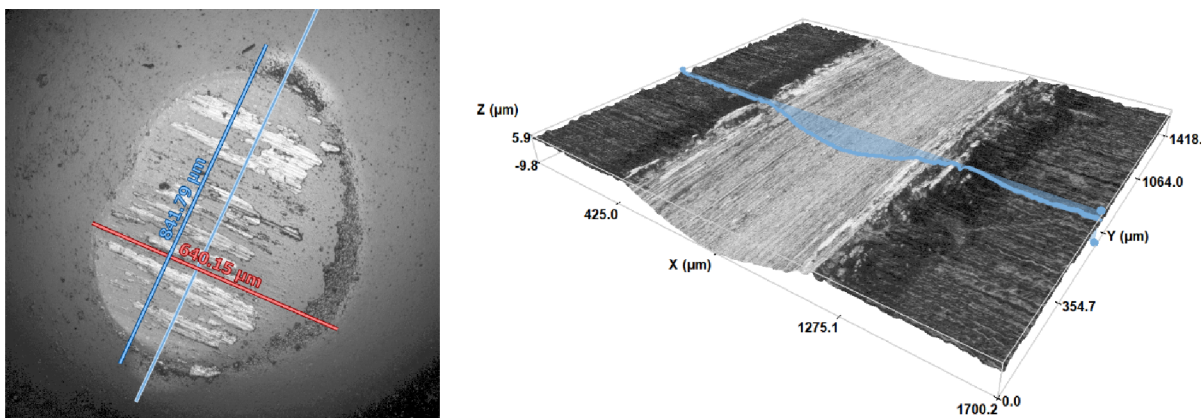
Opotřebení povrchu vzorku H13-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při RT



Opotřebení povrchu vzorku H13-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 300 °C



Opotřebení povrchu vzorku H13-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 400 °C



Opotřebení povrchu vzorku H13-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 500 °C

Obr. 3.15 Opotřebení povrchu vzorku H13-nav-Rc44 za různých teplot

Tabulky 3.16-3.18 přehledně popisují naměřené hodnoty deformace po experimentu s materiálem H13-nav-Rc44.

Tab. 3.16 Šířka profilu opotřebení materiálu u vzorku H13-nav-Rc44

| šířka profilu [μm] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|--------------|
| měření 1 | 885,9 | 975,7 | 952,3 | 906,7 |
| měření 2 | 793,5 | 863,9 | 1101,5 | 997,7 |
| měření 3 | 892,9 | 985,4 | 1013,0 | 898,6 |
| měření 4 | 869,5 | 1024,0 | 995,1 | 811,6 |
| Průměr | 860,5 | 962,3 | 1015,5 | 903,7 |
| Sm. odchylka | $\pm 45,7$ | $\pm 68,8$ | $\pm 62,7$ | $\pm 76,1$ |

Tab. 3.17 Hloubka profilu opotřebení materiálu u vzorku H13-nav-Rc44

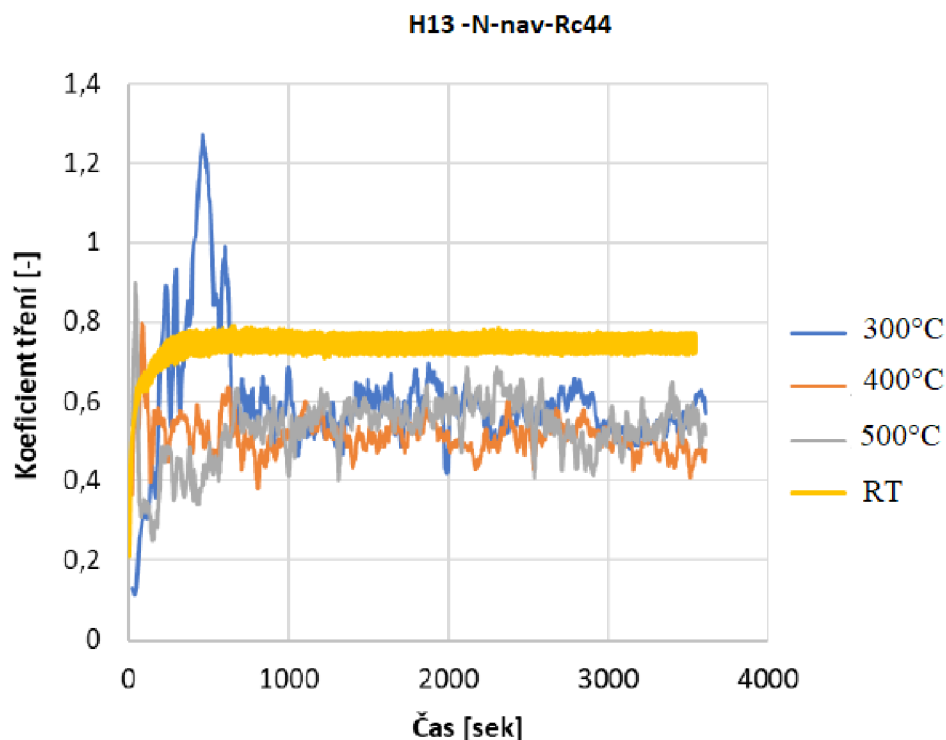
| hloubka profilu [μm] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|
| měření 1 | 0,194 | 14,709 | 13,236 | 6,104 |
| měření 2 | 0,595 | 11,778 | 10,005 | 12,944 |
| měření 3 | 0,657 | 14,055 | 8,801 | 10,478 |
| měření 4 | 0,699 | 10,708 | 11,065 | 10,756 |
| Průměr | 0,536 | 12,813 | 10,777 | 10,071 |
| Sm. odchylka | $\pm 0,232$ | $\pm 1,883$ | $\pm 1,882$ | $\pm 2,865$ |

Tab. 3.18 Opotřebení keramické kuličky při kontaktu se vzorkem H13-nav-Rc44

| teplota během experimentu | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Opotřebení kuličky [mm^3] | 0,01012 | 0,00299 | 0,00382 | 0,00361 |

Materiál H13-N-nav-Rc44

Následující graf 3.19 znázorňuje průběh koeficientu tření v čase a RT a za zvýšených teplot (300 °C, 400 °C a 500 °C).



Obr. 3.19 Průběhy koeficientu tření vzorku H13-N-nav-Rc44

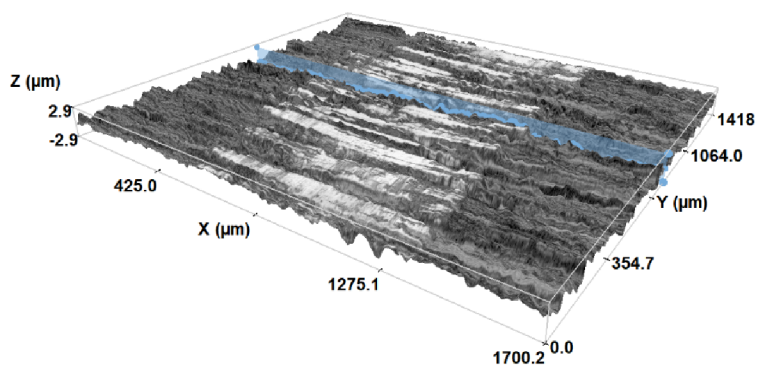
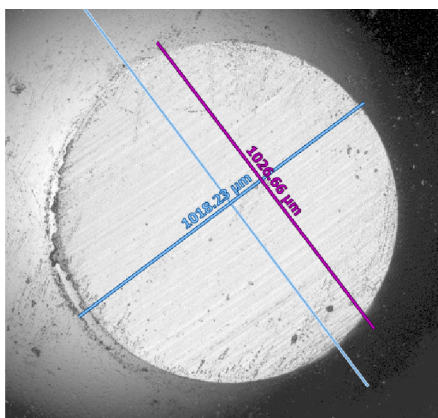
Naměřené průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchytky jsou vypsány v tabulce 3.20.

Tab. 3.20 Průměrné hodnoty koeficientu tření a směrodatné odchytky u vzorku H13-N-nav-Rc44

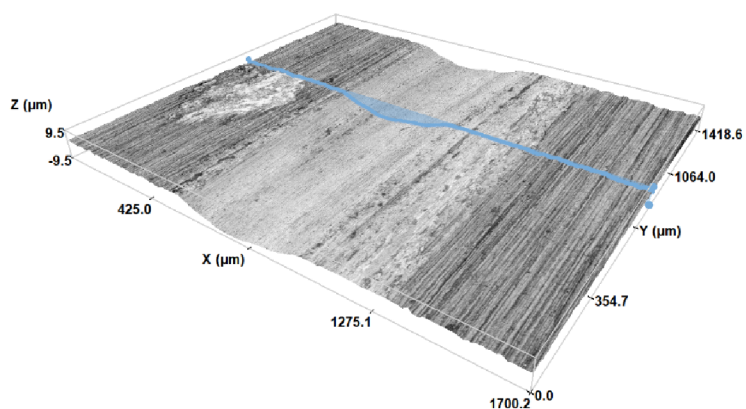
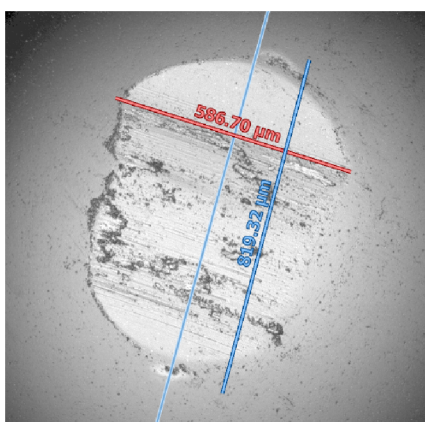
| teplota [°C] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| třecí koeficient [-] | 0,735 | 0,596 | 0,514 | 0,532 |
| Směrod. odchytka | ± 0,114 | ± 0,171 | ± 0,087 | ± 0,138 |

Hodnocení míry opotřebení

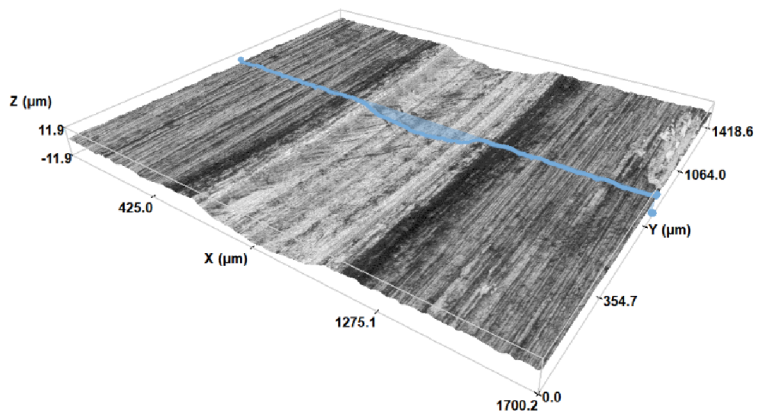
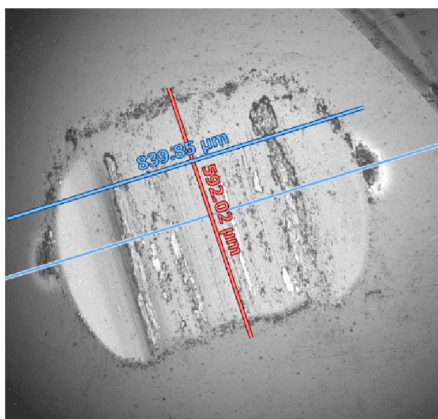
Stejně tak jako u předchozího vzorku, byla zkoumána deformační stopa po tribologickém experimentu. Deformace po kontaktu zkoumaného materiálu a keramické kuličky Si₃N₄ při tření na sucho při RT a při zvýšené teplotě viz obr. 3.21 Byla zkoumána šířka a hloubka profilu opotřebení na zkoumaném vzorku a objemové opotřebení keramické kuličky.



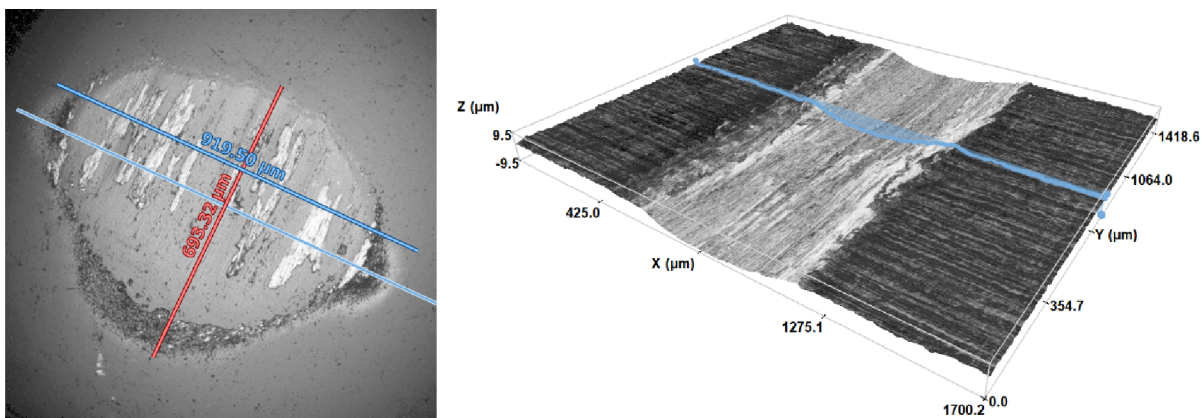
Opořebení povrchu vzorku H13-N-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při RT



Opořebení povrchu vzorku H13-N-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 300 °C



Opořebení povrchu vzorku H13-N-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 400 °C



Opotřebení povrchu vzorku H13-N-nav-Rc44 (vlevo – kulička, vpravo – povrch vzorku) při 500 °C

Obr. 3.21 Opotřebení povrchu vzorku H13-N-nav-Rc44 za různých teplot

Tabulky 3.22-3.24 přehledně popisují naměřené hodnoty deformace po experimentu s materiálem H13-N-nav-Rc44.

Tab. 3.22 Šířka profilu opotřebení materiálu u vzorku H13-N-nav-Rc44

| šířka profilu [μm] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| měření 1 | 826,8 | 914,9 | 746,6 | 790,8 |
| měření 2 | 934,3 | 851,5 | 761,8 | 1008,8 |
| měření 3 | 897,0 | 920,6 | 716,3 | 749,4 |
| měření 4 | 869,4 | 1017,2 | 747,9 | 846,0 |
| Průměr | 881,9 | 926,1 | 743,2 | 848,8 |
| Sm. odchylka | $\pm 45,3$ | $\pm 68,4$ | $\pm 19,2$ | $\pm 113,8$ |

Tab. 3.23 Hloubka profilu opotřebení materiálu u vzorku H13-N-nav-Rc44

| hloubka profilu [μm] | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|-----------------------------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| měření 1 | - | 11,596 | 12,379 | 8,659 |
| měření 2 | 0,327 | 10,189 | 12,497 | 3,977 |
| měření 3 | 0,425 | 9,972 | 12,830 | 11,043 |
| měření 4 | 0,648 | 11,698 | 12,089 | 13,218 |
| Průměr | 0,467 | 10,864 | 12,449 | 9,224 |
| Sm. odchylka | $\pm 0,165$ | $\pm 0,910$ | $\pm 0,307$ | $\pm 3,963$ |

Tab. 3.24 Opotřebení keramické kuličky při kontaktu se vzorkem H13-N-nav-Rc44

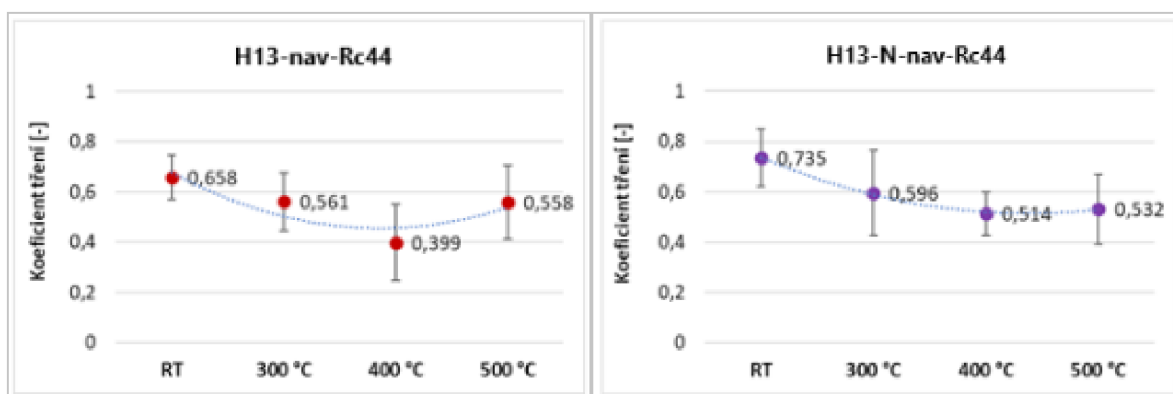
| teplota během experimentu | RT | 300 °C | 400 °C | 500 °C |
|--------------------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Opotřebení kuličky [mm^3] | 0,01773 | 0,00271 | 0,00285 | 0,00501 |

4. Diskuze výsledků

Po vytípnování materiálů (Cronitex Rc 44 a Cronitex Rc) v úvodní části experimentu bylo provedeno navaření na původní materiál ocel AISI H13 metodou TIG. Na vzorcích s novými návary byly měřeny hodnoty tvrdosti v příčném průřezu vzorku pro porovnání původní, promísené a nové oblasti ve stavu po navaření, po zakalení a po zakalení s popouštěním (u materiálu Chronitex Rc 52 po vytvrzení). Po porovnání naměřených hodnot tvrdosti a přihlédnutí k možným následným úpravám (nitridace) byl zvolen pro následné experimenty přídavný materiál Chronitex Rc 44, který byl dále testován ve stavu po navaření na ocel AISI H13 a ve stavu po žihání na měkko s nitridovaným povrchem. Na těchto vzorcích byla provedena tribologická zkouška metodou Ball-on-Disc. Vzorky byly testovány za RT a za zvýšených teplot (300 °C, 400 °C a 500 °C). Následující grafy znázorňují průměrné hodnoty výsledků tribologické zkoušky v závislosti na teplotě při realizaci. Nejprve koeficienty tření, dále pak změnu šířky profilu opotřebení, hloubku profilu opotřebení a míru opotřebení protikusu(keramická kulička).

Porovnání naměřených hodnot v závislosti na teplotě realizace

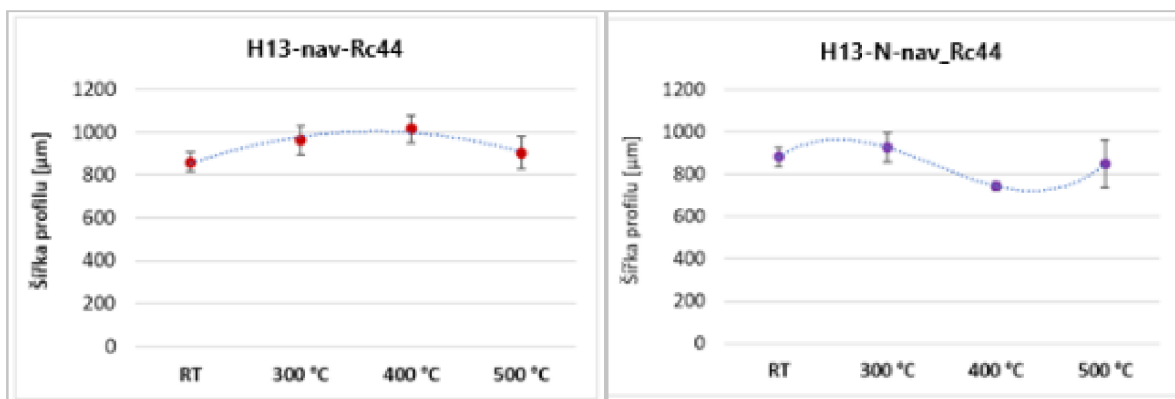
Na obr. 3.25 jsou zobrazeny změny koeficientu tření a příslušné směrodatné odchylky při změně teploty od RT do 500 °C vlevo pro materiál H13-nav-Rc44 a vpravo pro materiál H13-N-nav-Rc44.



Obr. 3.25 Změna koeficientu tření v závislosti na změně teploty od RT do 500 °C

Výsledky ukazují, že hodnota koeficientu tření se stoupající teplotou průměrně klesá u obou vzorků. Při RT se průměrné hodnoty koeficientu tření pohybují v rozmezí 0,6 a 0,8. Nejnižší průměrná hodnota (0,399) koeficientu tření byla naměřena při kontaktu třecí dvojice H13-nav-Rc44 s keramickou kuličkou Si₃N₄ při teplotě 400 °C.

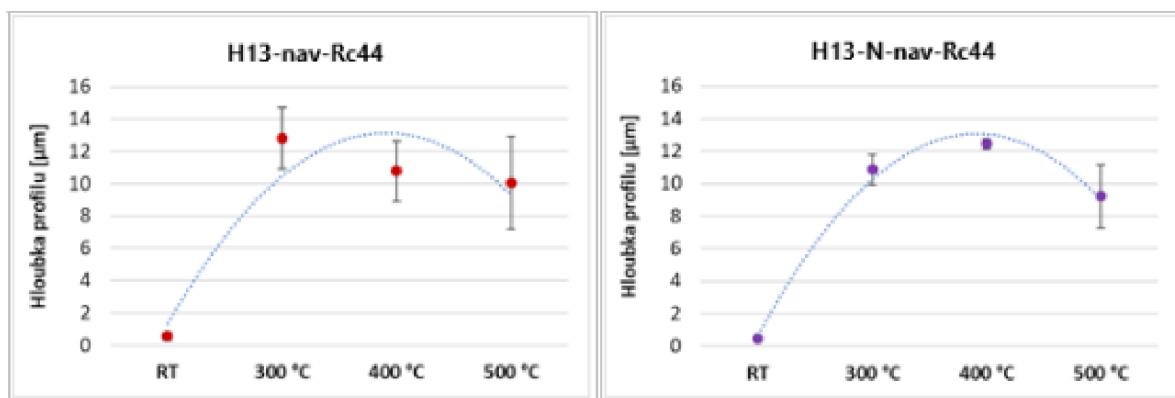
Na obr. 3.26 jsou zobrazeny změny šířky opotřebení při změně teploty od RT do 500 °C vlevo pro materiál H13-nav-Rc44 a vpravo pro materiál H13-N-nav-Rc44.



Obr. 3.26 Změna šířky opotřebení profilu při změně teploty od RT do 500 °C

Změna šířky profilu se u jednotlivých vzorků celkem výrazně liší, zatím co u materiálu H13-nav-Rc44 s teplotou mírně stoupá, až při teplotě 500 °C mírně klesá, u materiálu H13-N-nav-Rc44 je průběh kolísavý.

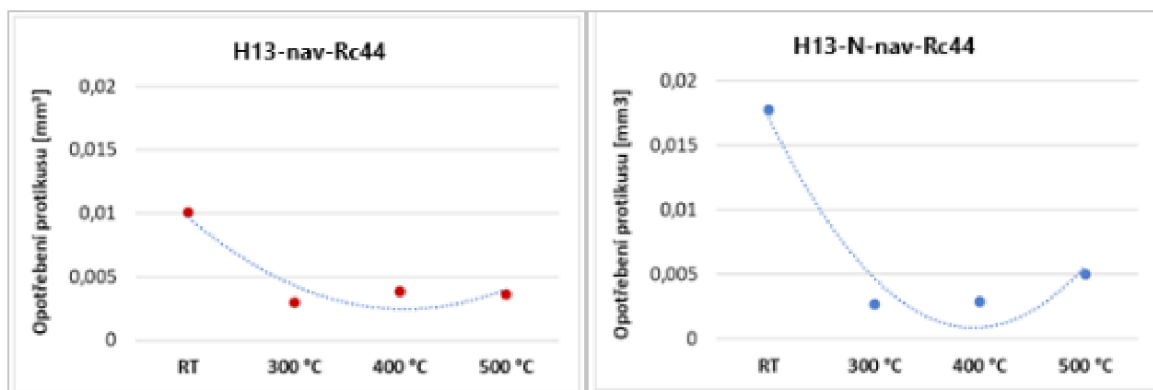
Na obr. 3.27 jsou zobrazeny změny hloubky opotřebení při změně teploty od RT do 500 °C vlevo pro materiál H13-nav-Rc44 a vpravo pro materiál H13-N-nav-Rc44.



Obr. 3.27 Změna hloubky opotřebení profilu při změně teploty od RT do 500 °C

Směna hloubky profilu je u obou materiálů podobná, mezi RT a 300 °C hodnota prudce stoupá, dále na vyšších teplotách stoupa už jen mírně a naopak klesá, při teplotě 500 °C je hloubka profilu nižší než při teplotě 300 °C.

Na obr. 3.28 jsou zobrazeny změny míry opotřebení protikusu (keramická kulička Si_3N_4) při změně teploty od RT do 500 °C vlevo pro materiál H13-nav-Rc44 a vpravo pro materiál H13-N-nav-Rc44.



Obr. 3.28 Opotřebení protikusu (keramická kulička Si_3N_4) po kontaktu se zkoumanými materiály

Opotřebení protikusu je zjevně ovlivněno právě koeficientem tření, čím vyšší koeficient, tím vyšší míra opotřebení protikusu.

5. Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo navrhnout a otestovat nový materiál pro opravu nástrojů z oceli AISI H13 pracujících za zvýšených teplot. V teoretické části jsou zmíněny materiály, které byly pro tuto nebo podobnou operaci již dříve použity. Dále je zde uvedena problematika degradačních procesů, nároky na funkční vrstvy nástrojů a provedena rešerše svařovacích technologií, kterými je možno opravu provést. Na konci teoretické části jsou vedeny tribologické zkoušky pro testování materiálu a charakteristika oceli AISI H13. Experimentální část je možno rozdělit do několika bodů.

- Volba návarového materiálu. V této části byly vytipovány materiály:

Cronitex Rc 44(CrMoV) pro jeho dobrou tvrdost, malou aktivitu vůči změnám za vysokých teplot, dobrou odolnost proti trhlinám a možnost následné nitridace, protože se jedná o materiál s chemickým složením podobným k základnímu materiálu. Cronitex Rc 52(NiCoMo) byl zvolen, protože se jedná o kobaltový návar umožňující navařování bez přehřevu a také sekundární vytvrzení navařené vrstvy. Tento materiál u není možné následně nitridovat.

- Byl optimalizován proces navařování obou materiálů tak, aby vnávaru nevznikaly trhliny a to jak při vlastním svařování, tak i při následném PWTM, či plazmové nitridaci. Vzhledem k použítým parametrům byly návary realizovány ve dvou, respektive ve třech vrstvách.
- Vyhodnocení jednotlivých návarů vlivu PWTM bylo provedeno zkouškou tvrdosti dle Vickerse. Sekundární vytvrzení umožnilo u materiálu Chronitex Rc 52 dosáhnout tvrdosti přes 550 HV.
- Z důvodu možnosti aplikovat na návar plazmovou nitridaci, byl pro následné tribologické testy použit již pouze materiál Chronitex Rc44.
- Bylo provedeno tribologické testování metodou Ball-on-Disc za RT a za zvýšených Disc za RT a za zvýšených teplot (300; 400 a 500 °C) na návaru Cronitexu Rc 44 (H13-nav-Rc44) a na nitridovaném povrchu návaru (H13-N-nav-Rc44).
- Nejnižší hodnota koeficientu tření byla zjištěna u vzorku H13-nav-Rc44 při teplotě 400 °C a nejvyšší hodnota u vzorku H13-N-nav-Rc44 za pokojové teploty.
- Plazmová nitridace pomohla zvýšit tribologickou odolnost povrchu návaru, zejména za zvýšených teplot. Z pohledu hloubky stopy opotřebení došlo ke zlepšení odolností až o 15% a u šířky stopy opotřebení dokonce až o 23%.



Na základě naměřených výsledků je možné konstatovat, že oprava nástrojů z oceli AISI H13 pro práci za zvýšených teplot za pomoci materiálu Cronitex Rc 44 je možná, a to nejlépe s následnou nitridací povrchu. Tvrdost navařeného materiálu je srovnatelná se základním materiálem a díky následné nitridaci se tvrdost ještě zvýší alepší se tribologické vlastnosti funkční vrstvy.



Zdroje :

[1] *Poškození strojních součástí* [online]. 2022. [cit. 2022-05-11]. Dostupné z:

<https://adoc.pub/pokozeni-strojnich-souasti.html>

[2] DAŘOUREK, Karel. *Vybrané technologie povrchových úprav: Tenké tvrdé vrstvy* [přednáška]. 2006 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/VTM/vtm%20Dad/11tenkevrstvy.pdf. Technická univerzita v Liberci.

<https://www.citacepro.com/dok/FVvy65ANMF0ih4vI?kontrola=1>

[3] VÍTOVEC, David. *Kvalita povrchové vrstvy po obrábění těžkoobrobitelných a titanových slitin* [online]. Praha, 2015 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze.

Fakulta strojní. Ing. Vítězslav Rázek, CSc. Dostupné z:

<https://core.ac.uk/download/pdf/47182826.pdf>

[4] NOSEK, Vladimír, *Koroze a technologie povrchových úprav: Úvod do koroze* [přednáška]. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:

http://www.kmt.tul.cz/kestaz/KMT_KPU_PR_01_CZE_Nosek_Uvod_do_koroze.pdf.

[5] WD-40 Company, *Co znamená prevence koroze?* In: wd40.cz [online]. 2022 [cit. 2022-07-03].

Dostupné z: <https://wd40.cz/domacnost/co-znamená-prevence-koroze/>

[6] MIKULEC, Roman. *Systémové srovnání měření adheze* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-03].

Diplomová práce. České vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství. Ing. Stanislav Tokař. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103401

[7] SOJKA, Lukáš. *Stanovení součinitele tření a analýza frikčního povrchu kovo-keramických brzdových desek*. [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2022-05-07]. Diplomová práce. Vysoká škola báňská

– Technická univerzita Ostrava. Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství. Ing. Miroslav

Vaculík, Ph.D. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/94772996.pdf>

- [8] HRON, Tomáš. *Měření drsnosti povrchu pro průmyslové aplikace*. [online]. Praha, 2017 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Doc. Ing. Jan Hošek, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/70869/F2-BP-2017-Hron-Tomas-BP_Hron_final.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [9] JIRKA, Tomáš. *Kovové otěruvzdorné materiály užívané ve stavebnictví* [online]. Plzeň, 2013 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta strojní. Ing. Jaroslav Kaiser, Ph.D. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11025/9335>
- [10] HRABINA, Martin. *Renovace nástrojových ocelí pro tváření za studena* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ing. Jaroslav Kubíček. Dostupné z: <https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/40533/final-thesis.pdf?sequence=6>
- [11] NEŠPOR, Vít. *Přehled současných metod a zařízení pro měření koeficientu tření v mazaném kontaktu třecích povrchů*. [online]. Brno, 2011 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ing. Daniel Koutný, Ph.D. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40449
- [12] MIKULEC, Roman. *Systémové srovnání měření adheze vozovky* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Ústav soudního inženýrství. Ing. Stanislav Tokař. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103401
- [13] LASEK, Stanislav. *Základy degračních procesů*. [online]. 2012 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.fmfi.vsb.cz/export/sites/fmfi/modin/cs/studijni-opory/resitelsky-tym-3-materialove-izenyrstvi/zaklady-degradacnich-procesu/Lasek_Zaklady_degradacnich_procesu.pdf
- [14] Hielscher Ultrasonics GmbH, Ultrazvukové kavitace v kapalinách. In: hielscher.com [online]. © 1999-2022. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.hielscher.com/cs/ultrasonic-cavitation-in-liquids-2.htm>

- [15] JUREČKA, Martin. *Erozivní účinky kavitace* [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Prof. Ing. František Pochylý, CSc. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27956
- [16] Kavitace. *Wikiskripta.eu* [online]. WikiSkripta, projekt 1. lékařské fakulty a Univerzity Karlovy, příspěvek UK k výukovým zdrojům sítě lékařských fakult MEFANET, poslední aktualizace 14. 1. 2019 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.wikiskripta.eu/w/Kavitace>
- [17] Kavitace. *Wikipedia.org* [online]. Příspěvatelé Wikipedie, poslední aktualizace 04.1. 2022, 4. 1. 2022 v 18:55. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Kavitace>
- [18] HOFFMANN, Martin. *Navarování otěrvzdorných materiálů* [online]. Brno, 2015 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Prof. Ing. Jan Suchánek, CSc. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73089/F2-BP-2017-Hoffmann-Martin-NAVAROVANI%20OTERUVZDORNYCH%20MATERIALU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [19] JIREŠ, Daniel. *Renovace pojzdového kola jeřábu navařováním* [online]. Brno, 2016 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128218
- [20] SEDLÁK, Martin. *Únavové vlastnosti korozivzdorné austenitické oceli*. [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17743
- [21] PETELE, Miroslav -MITCalc, mitcalc.com, Strojírenské průmyslové a technické výpočty [online]. © 2003 – 2022. [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: https://www.mitcalc.com/index_cz.htm

- [22] ZELENDA, Michal. *Únavový lom klikové hřídele osobního automobilu*. [online]. Pardubice, 2010 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. Univerzita Pardubice. Dopravní fakulta Jana Pernera. Ing. Pavel Švanda, Ph.D. Dostupné z:
https://dk.upce.cz/bitstream/handle/10195/36709/ZelendaM_Unavovylom_PS_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [23] HRADIL, David. *Korozivzdorné oceli pro součásti parního sterilizátoru* [online]. Brno, 2014 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Doc. Ing. Bohumil Pacal, CSc. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=84309
- [24] LASEK, Stanislav. *Základy degračních procesů: studijní opora*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2013. [cit. 2022-05-03] ISBN 978-80-248-3373-6.
- [25] HŘEBÍČEK, Pavel. *Žihání ke snížení vnitřního pnutí svařenců s otěruvzdornými plechy*. [online]. Brno, 2017 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ing. Karel Němec, Ph.D. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=148579
- [26] <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/73089/F2-BP-2017-Hoffmann-Martin-NAVAROVANI%20TERUVZDORNYCH%20MATERIALU.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [27] JUREČKA, Martin. *Erozivní účinky kavitace*. [online]. Brno, 2010 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Prof. Ing. František Pochylý, CSc. Dostupné z: https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=27956
- [28] SOBOTKOVÁ, Michaela. *Odborné posouzení součástí z pohledu hodnocení kvality mazacího systému* [online]. Brno, 2013 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Mendelova univerzita v Brně. Institut celoživotního vzdělávání. Doc. Ing. Michal Černý, CSc. Dostupné z:
<https://adoc.pub/queue/mendelova-univerzita-v-brn-institut-celoivotniho-vzdlavani-oecd982747fe50867f3ce7332636e42b452432.html#>

- [29] SEDLÁK, Martin. *Únavové vlastnosti korozivzdorné austenitické oceli*. [online]. Brno, 2009 [cit. 2022-05-07]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Doc. Ing. Stanislav Věchet, CSc. Dostupné z:
https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=17743
- [30] Surface and coating technology: Thermal fatigue study of tungsten alloy WNi28Fe15 clad on AISI H13 hot work tool steel. *Sciencedirect.com* [online]. 2016, 15 January 2016 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897215302826>
- [31] Journal of Alloys and Compounds: Microstructure and mechanical properties of Co-based alloy coatings fabricated by laser cladding and plasma arc spray welding. *Sciencedirect.com* [online]. 2019, 15 May 2019 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838819300647>
- [32] Surface and Coatings Technology: Hardfacing of AISI H13 tool steel with Stellite 21 alloy using cold metal transfer welding process. *Sciencedirect.com* [online]. 2017, 15 October 2017 [cit. 2022-05-07]. Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0257897217307405>
- [33] HAVLÍK, Petr. Strukturní stabilita svarového spoje uhlíková/austenitická ocel [online]. Brno, 2012 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Prof. Ing. Rudolf Foret, CSc. Dostupné z:
<https://core.ac.uk/download/pdf/30308101.pdf>
- [34] MMA | svařování obalenou elektrodou [online]. 2022 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z:
<https://www.svarcikukla.cz/blog/mma-svarovani-obalenou-elektrodou/>
- [35] Svařování pod tavidlem (SAW). *Svarbazar.cz* [online]. 2010, 28. 01. 2010 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocclanku=2009010801>
- [36] Submerged arc welding schematic.svg. In: *Wikimedia.org* [online]. 2009 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Submerged_arc_welding_schematic.svg

- [37] Co je vlastně... svařování MIG/MAG?. *Blog.perfectwelding.fronius.com: Perfect welding blog* [online]. 2015, 15.12. 2020 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://blog.perfectwelding.fronius.com/cs/co-je-svarovani-mig-mag/>
- [38] MIG/MAG svařování: Celosvětově nejpoužívanější metody svařování. *Messer.cz* [online]. [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.messer.cz/mig/mag-svarovani> -> na webu není datum vydání článku
- [39] *Automig Internetový magazín: TIG (Tungsten Inert Gas Welding* [online]. 2015 [cit. 2022-05-11]. Dostupné z: <https://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
- [40] TIG svařování I - základní principy. *Svarbazar.cz* [online]. 2009, 07. 01. 2009 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702&>
- [41] H13 Lisovací ocelová kulatá tyč. *Sichuan Liaofu Special Steel Company* [online]. 2017, 16.2.2017, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://m.cz.lfmetalproduct.com/mould-steel/mould-steel-bar/h13-mould-die-steel-round-bar.html>
- [42] About us. *Qiluspecialsteel.com* [online]. 2014, 6.5.2014, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.qiluspecialsteel.com/cs/about-us>
- [43] 1.2344 / X40CRMOV5-1 / 19554 / H13 / TLH. *Toolsteel.cz* [online]. 2019, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <http://toolsteel.cz/1-2344-x40crmov5-1-19554-h13-tlh/>
- [44] Horká pracovní hrana H13. *Lkalloy.com* [online]. 2018, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://lkalloy.com/cs/tungsten-carbide-alloys/h13-tool-steel/>
- [45] KAWULOK, Petr, KAWULOK, Rostislav, RUSZ, Stanislav. *Metodika sestavování rozpadových diagramů typu CCT a DCCT (tzn. i s uvažováním vlivu předchozí deformace.)* [online]. Ostrava, 2017 [cit. 2022-05-03]. Dostupné z: <https://www.fmt.vsb.cz/export/sites/fmt/633/cs/studium/navody-k-cviceni/deformacni-chovani-materialu/cviceni-12/Doc/cv12.pdf>

[46] RENDL, Míkoláš. *Tribologie pro letecké aplikace*. [online]. Praha, 2019 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ing. Petr Drašnar, Ph.D. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/84726/F2-DP-2019-Rendl-Mikolas-DP.pdf?sequence=-1&isAllowed=y>

[47] BLAŽEK, Tomáš. *Studium vlastností tenkých vrstev a jejich aplikace v medicíně* [online]. Liberec, 2015 [cit. 2022-05-03]. Diplomová práce. Technická univerzita v Liberci. Fakulta strojní. Prof. Ing. Petr Louda, CSc. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/17375/Tomáš%2BBlažek_DP.pdf?sequence=1

[48] Tribologické vlastnosti. *Opi.zcu.cz* [online]. 2007, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.opi.zcu.cz/tribologie.html>

[49] MOC, Petr. *Posouzení mechanických vlastností 3D tisknutých a tvářených dílů z nástrojové oceli H13* [online]. Liberec, 2021 [cit. 2022-05-03]. Bakalářská práce. Technická univerzita Liberec. Fakulta strojní. Ing. Iva Nováková, Ph.D. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/160704/BP_MOC_2021.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[50] PŘÍDAVNÉ SVAŘOVACÍ MATERIÁLY: CRONITEX RC 44. *Welco.cz* [online]. 2018, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.welco.cz/cs/cronitex-rc-44>

[51] PŘÍDAVNÉ SVAŘOVACÍ MATERIÁLY: CRONITEX RC 52. *Welco.cz* [online]. 2018, [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.welco.cz/cs/cronitex-rc-52>

[52] Totální řešení automatizace: Svařovací procesy. *Welmet.cz* [online]. 2019 [cit. 2022-05-08]. Dostupné z: <https://www.welmet.cz/automatizace/totalni-reseni/>