



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VLIV ŘEZNÝCH PODMÍNEK NA INTEGRITU POVRCHU AUSTENITICKÉ OCELI

THE EFFECT OF CUTTING CONDITIONS ON SURFACE INTEGRITY OF AUSTENITIC STEEL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ján Husár

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Matúš Varhaník

BRNO 2019

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie
Student: **Ján Husár**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojírenského inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Matúš Varhaník**
Akademický rok: 2018/19

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

Vliv řezných podmínek na integritu povrchu austenitické oceli

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce se zabývá vlivem řezných podmínek na povrchovou a podpovrchovou vrstvu obráběného materiálu, teoretickým rozбором zpevňování austenitické struktury, návrhem experimentálních zkoušek a jejich vyhodnocením.

Cíle bakalářské práce:

- Obrobitelnost austenitických ocelí a jejich využití.
- Integrita povrchu a její hodnocení.
- Návrh experimentální zkoušky.
- Realizace experimentu a vyvození výsledků.

Seznam doporučené literatury:

FOREJT, M. a PÍŠKA, M. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Brno. Akademické nakladatelství CERM s.r.o., 2006. ISBN 80-214-2374-9.

Příručka obrábění - Kniha pro praktiky. Přel. M. Kudela. AB Sandvik Coromant. Praha. Scientia, s.r.o.

NESLUŠAN, M. Experimentálne metódy v trieskovom obrábaní. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-80-8070-711-8.

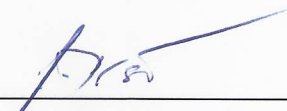
PTÁČEK, L. Nauka o materiálu II. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-720-4248-3.

MARSHALL, P. Austenitic stainless steels: microstructure and mechanical properties. London: Elsevier Applied Science Publishers, 1984. ISBN 08-533-4277-6.

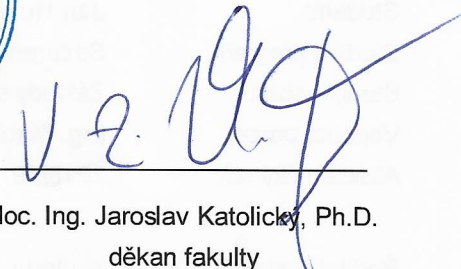
Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19.

V Brně, dne 26. 10. 2018





prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
ředitel ústavu



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

ABSTRAKT

Cieľom tejto práce bolo teoreticky rozobrať problematiku obrobiteľnosti austenitických ocelí a ich využitie. V dokumente sa ďalej rozoberajú faktory, ktoré ovplyvňujú samotný rezný proces, ako sú rezný nástroj, obrábací stroj, rezné prostredie a rezné podmienky. V ďalšej časti práce je navrhnutá experimentálna skúška a jej následná realizácia pri ktorej sa jednotlivé vzorky ocele sústružili. V poslednej časti práce sú zhrnuté výstupy z experimentu a hodnotenie vybraných vlastností povrchovej a podpovrchovej vrstvy obrábaných vzoriek.

Kľúčové slová

obrobiteľnosť, austenitická oceľ, rezné podmienky, integrita povrchu, rezná rýchlosť

ABSTRACT

The aim of this work was theoretically to analyze the issue of machinability of austenitic steels and their use. The document also discusses factors that affect the cutting process itself, such as the cutting tool, machine tool, cutting environment and cutting conditions. In the next part of the bachelor's thesis, an experimental test and its realization at which individual steel samples were turned is proposed. The last part of the thesis summarizes the result of the experiment and evaluates selected properties of the surface and subsurface layers the processed samples.

Key words

machinability, austenitic steel, cutting conditions, surface integrity, cutting speed

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

HUSÁR, Ján. *Vliv řezných podmínek na integritu povrchu austenitické oceli*. Brno 2019. Dostupné také z <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117212>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Matúš Varhaník.

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som bakalársku prácu na tému **Vliv řezných podmínek na integritu povrchu austenitické oceli** vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov, uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

.....
Dátum

.....
Ján Husár

POĎAKOVANIE

Ďakujem týmto vedúcemu bakalárskej práce Ing. Matúšovi Varhaníkovi za cenné rady a pripomienky pri vypracovaní práce. Ďalej ďakujem doc. Ing. Igorovi Barényimu, PhD. a doc. Ing. Jozefovi Majeríkovi, PhD. za konzultácie a pomoc pri spracovávaní experimentálnej časti práce. V neposlednom rade ďakujem rodine a priateľke za podporu pri písaní záverečnej práce.

OBSAH

ABSTRAKT	3
BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA	4
ČESTNÉ PREHLÁSENIE	5
POĎAKOVANIE	6
OBSAH	7
ÚVOD	8
1 TEORETICKÁ ČASŤ	9
1.1 Rozdelenie a štruktúra.....	9
1.2 Využitie.....	11
2 OBROBITEĽNOSŤ	12
2.1 Rozbor obrobiteľnosti austenitických ocelí	13
2.2 Materiál rezného nástroja.....	15
2.2.1 Povlakovanie.....	16
2.3 Geometria rezného nástroja	17
2.4 Rezné prostredie	18
3 METÓDY VYHODNOCOVANIA VRSTIEV PO OBRÁBANÍ.....	20
3.1 Nanointendačné skúšky.....	20
3.1.1 Princíp merania nanomechanickým prístrojom	20
3.2 Hodnotenie štruktúry povrchu	22
4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ	24
4.1 Výber obrábacieho stroja	24
4.2 Výber rezného nástroja	25
4.3 Príprava vzoriek.....	26
4.4 Rezné podmienky	27
5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU.....	29
5.1 Výsledné profily drsnosti a vlnitosti.....	29
5.2 Výsledky nanomechanických skúšok	32
5.3 Tvar triesky	34
ZÁVER	36
ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY	37
ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK.....	40
ZOZNAM PRÍLOH.....	41

ÚVOD

Austenitické ocele patria do skupiny koróziivzdorných ocelí. Ich vlastnosti ich predurčujú pre široké využitie v rôznych druhoch priemyselných odvetví ako sú potravinársky, papierenský alebo chemický priemysel. Uplatnenie nachádzajú aj v zdravotníctve, kde sa používajú napríklad pri výrobe skalpelov ale stretávame sa s nimi aj v každodennom živote, napríklad v podobe kuchynského príboru.

Vlastnosti ako žiaruvzdornosť, žiarupevnosť a odolnosť proti korózií, ktoré sú pre austenitické ocele charakteristické, nadobúdajú vďaka legujúcim prvkom, z ktorých najvýznamnejšie sú chróm, nikel a mangán. Značné množstvá legúr so sebou však prinášajú aj problémy spojené s obrobitelnosťou.

Ako hlavné ciele tejto práce boli vytýčené zhodnotenie obrobitelnosti z teoretického hľadiska, následný návrh experimentu, jeho realizácia a nakoniec vyhodnotenie údajov získaných v praktickej časti.

V tejto práci sa spájajú poznatky, ako z oblasti obrábania kovov, tak aj z oblasti materiálového inžinierstva. Tieto dva odbory boli počas bakalárskeho štúdia pre mňa smerodajné a preto bolo jedným z kritérií pri výbere témy ich prepojenie v záverečnej práci. Ďalším pozitívom v prípade danej témy bola možnosť zoznámiť sa s aktuálnymi možnosťami hodnotenia štruktúry materiálu.

V jednotlivých častiach tohto dokumentu sa objavujú jedny z najmodernejších dostupných metód hodnotenia, ako povrchovej, tak podpovrchovej vrstvy obrábaného materiálu. Dôraz je takisto kladený na ďalšie faktory, ktoré ovplyvňujú proces obrábania.

1 TEORETICKÁ ČASŤ

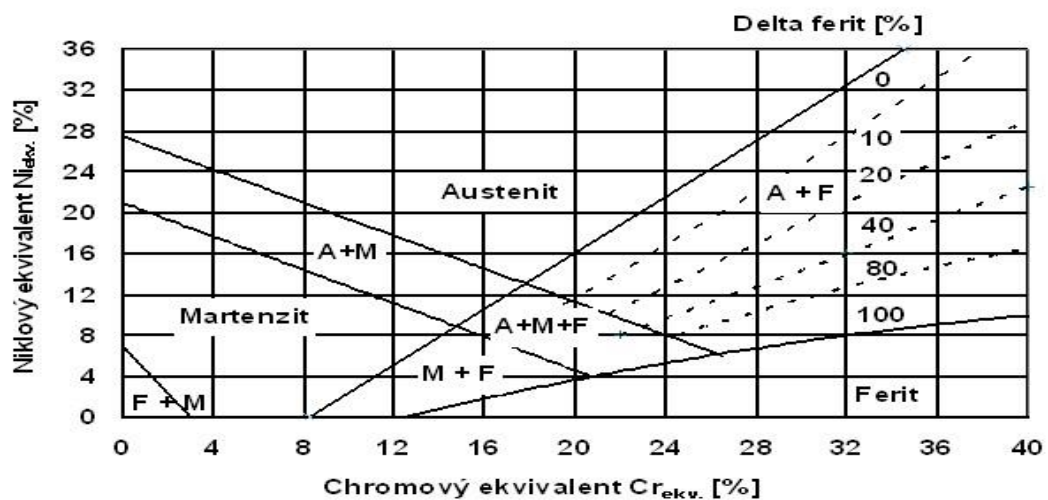
Austenitické ocele sú radené spolu s martenzitickými a feritickými ocelami do kategórie koróziívzdorných ocelí. Austenitickú štruktúru môžeme za normálnej teploty pozorovať u vysokolegovaných ocelí. Hlavnými legujúcimi prvkami sú chróm v percentuálnom zastúpení od 12 % do 30 % a nikel od 7 % do 25 %. U týchto ocelí je pozorovateľná dobrá zvarateľnosť, vysoká húževnatosť, žiaruvzdornosť (do 1150 °C) a tiež žiarupevnosť (do 750 °C). Medzi nevýhody patrí vysoká cena, horšia obrobitelnosť, sklon ku koróznemu praskaniu pod napätím a zlá tepelná vodivosť, ktorá je spôsobená pomerne veľkým množstvom legujúcich prvkov [1].

1.1 Rozdelenie a štruktúra

Z hľadiska zliatinových prvkov môžeme rozdeliť austenitické nehrdzavejúce ocele na nasledujúce typy [2]:

- chrómniklové – obsah Cr je v rozmedzí 12–25 %, obsah Ni 8–38 %, obsah C 0,01–0,15 %. Tieto oceli je možno legovať dusíkom, molybdénom prípadne nióбом a titanom pre zvýšenie mechanických vlastností.
- chrómmangánniklové – obsah Cr v rozmedzí 12–22 %, obsah Ni 3–8 %, obsah C 0,02–0,15 % a obsah Mn 3–8 %. Daný typ oceli je možno legovať dusíkom, meďou alebo molybdénom za účelom zvýšenia odolnosti proti koróziám.
- chrómmangánové – obsah Cr v rozmedzí 10–18 %, obsah Mn 14–25 %, obsah C 0,02–0,08 %. Možné legovanie dusíkom, molybdénom a stabilizovanie titanom a nióбом.

Na určenie výslednej štruktúry koróziívzdornej ocele je používaný Schaefflerov diagram, vid' obrázok 1. Výpočtom chrómového ekvivalentu, vid' vzťah 1.1 a niklového ekvivalentu, vid' vzťah 1.2, je možné zistiť, či daná oceľ má štruktúru austenitickú, martenzitickú, feritickú alebo prípadne ich kombinácie (duplexné ocele).



Obr. 1 Schaefflerov diagram [3].

$$E_{Cr} = Cr + 2Mo + 1,5Si + 0,5Nb + 0,5Ti \quad (1.1)$$

$$E_{Ni} = Ni + 0,5Mn + 30C + 30N \quad (1.2)$$

Legujúce prvky významne ovplyvňujú štruktúru, mechanické vlastnosti a aj korózne vlastnosti austenitických ocelí. Medzi najvýznamnejšie patria [2]:

- chróm – feritotvorný prvok, z hľadiska odolnosti proti korózií najvýznamnejší legujúci prvok,
- nikel – austenitotvorný prvok, zapríčiňuje existenciu austenitickej štruktúry aj za normálnych teplôt, stabilizuje austenit. Významný protikorózný vplyv,
- mangán – austenitotvorný prvok, pri obsahu vyššom ako 3 % minimalizuje praskanie zvarov, zvyšuje rozpustnosť dusíka,
- uhlík – austenitotvorný prvok, stabilizuje austenit, má pozitívny vplyv na pevnostné charakteristiky, negatívny vplyv na medzikryštálovú koróziu,
- dusík – austenitotvorný prvok, pozitívny vplyv na pevnostné charakteristiky, ako aj na odolnosť proti štrbinovej a bodovej korózií,
- molybdén – feritotvorný prvok, má výrazne pozitívny vplyv na odolnosť voči medzikryštálovej korózií, spôsobuje nárast žiarupevnosti.

Medzi ďalšie legujúce prvky patria kremík, meď, síra, titan, niób, hliník, selén, fosfor, olovo a bór, pričom ich prítomnosťou je možné ovplyvňovať napríklad obrobitelnosť, tvárnosť, žiaruvzdornosť a koróziivzdornosť [2].

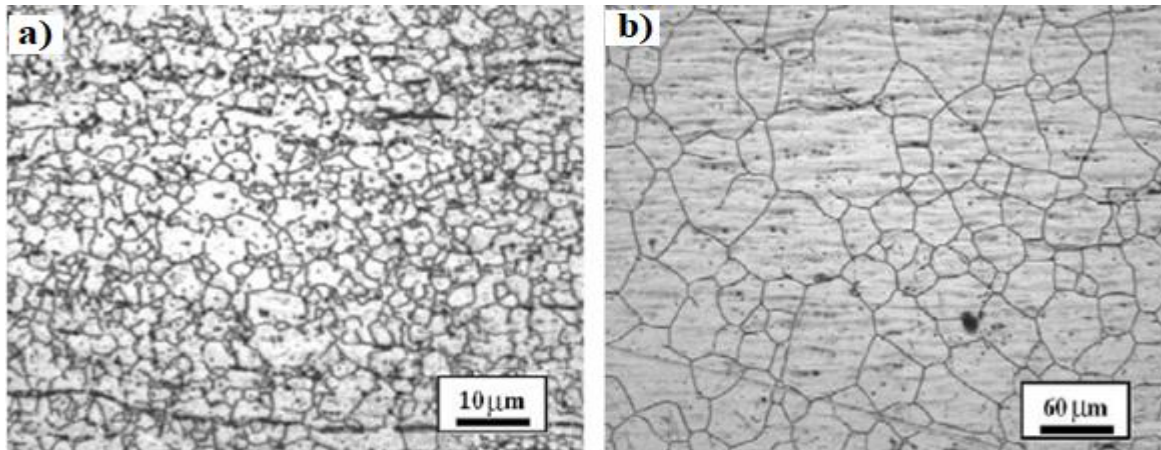
Ukazuje sa taktiež, že pridaním malého množstva vanádu (do 0,3 %), sa zlepšuje odolnosť proti tečeniu (*creep*) [4].

Na obrázku 2 je uvedená oceľ 1.4301 (ČSN 17240) a jej výsledná austenitická štruktúra po žíhaní na teplotách 780 °C a 1100 °C pri výdržiach 5 minút a 15 minút [5].

Nežiadúcou poruchou v štruktúre je vylučovanie karbidov chrómu a to hlavne typu Cr₂₃C₆. Tieto karbidy sa vylučujú na hraniciach zŕn a tým odčerpávajú chróm z kovovej matrice. V konečnom stave to môže mať za následok stratu schopnosti pasivácie a tým stratu odolnosti proti hrdzaveniu, ak podiel chrómu v matrici klesne pod 12 %.

Zamedzenie tomuto javu je možné [1]:

- znížením obsahu uhlíka pod 0,02 %,
- rozpúšťacím žíhaním, ktoré je nasledované rýchlym ochladením,
- pridaním prvkov, ako sú napríklad Ti alebo Nb, ktoré majú vyššiu afinitu k uhlíku ako chróm a vytvárajú v oceli stabilné karbidy – stabilizácia.



Obr. 2 Austenitická štruktúra [5]: a) 5 min výdrž na 780 °C, b) 15 min výdrž na 1100 °C.

1.2 Využitie

Nižšie použité zdroje uvádzajú, že spomedzi nehrdzavejúcich ocelí sú práve austenitické ocele najpoužívanejšie. Príčinou je práve ich vysoká odolnosť proti korózii [6]. Pre priemyselné využitie sú vhodné najmä pre ich dobrú tvárnosť, zvarateľnosť a taktiež široké spektrum teplôt, ktoré sú schopné znášať. Uplatnenie nachádzajú v extrémne korózných prostrediach a to hlavne na výrobu nádob a potrubí, chemickom, potravinárskom, ťažiariskom a v neposlednom rade vo farmaceutickom priemysle, kde sa používajú na výrobu chirurgických nástrojov [7].

Ďalšou oblasťou využitia je energetika. Austenitické ocele sú náchylné na korózne praskanie po ožiarení, avšak ukazuje sa vhodnosť použitia modifikovanej ocele PNC316 (ekvivalentom v značení DIN modifikovaná oceľ 1.4401) v nastupujúcej IV. generácii jadrových reaktorov, ktoré sú jednoduchšie a zároveň účinnejšie [8].

Bežne sa vyskytujú ako súčasti sklárskych a keramických pecí, topné odpory, kuchynské náčinie, používajú sa na výrobu prídavných spaľovačov u lietadiel, alebo u prehrievačov pary [1,7].

Na obrázku 3 je zobrazené potrubie z austenitickej ocele.



Obr. 3 Potrubie z austenitickej ocele [7].

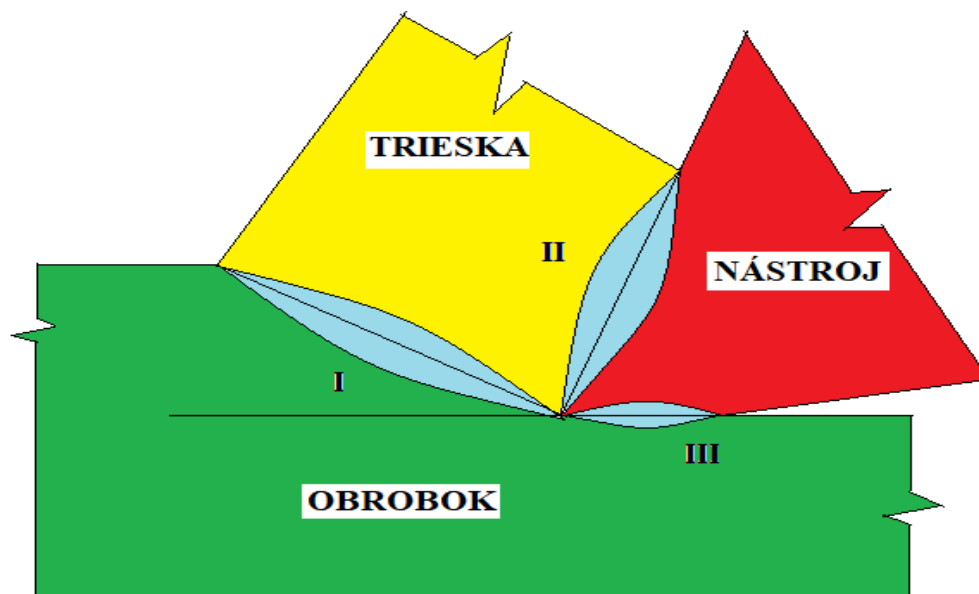
2 OBROBITEĽNOSŤ

Medzi vlastnosti, ktoré ovplyvňujú obrobiteľnosť určitého typu ocele sú zaradené abrazívnosť, sklon k deformačnému spevneniu, tvrdosť, vodivosť a ťažnosť, alebo sklon k adhéznemu správaniu sa [9].

Ďalšími významnými faktormi, na ktorých je obrobiteľnosť materiálu závislá sú [10]:

- spôsob výroby a tepelné spracovanie,
- chemické zloženie,
- mechanické a fyzikálne vlastnosti,
- metóda obrábania,
- geometria nástroja,
- druh a vlastnosti nástroja.

Dôležité vlastnosti, ktoré ovplyvňujú chovanie koróziívzdorných ocelí pri obrábaní sú, ako vyššia pevnosť v ťahu, tak aj väčší rozptyl medzi pevnosťou a pevnosťou v lome ako pri uhlíkových oceliach. Energia potrebná na obrábanie tohto typu ocelí je preto vyššia ako pri konštrukčných uhlíkových oceliach. Medzi ďalšie faktory patria nízka tepelná vodivosť a vysoká miera vytvrdzovania, ktoré rovnako zvyšujú spotrebu energie oproti ostatným druhom ocelí. Nízka tepelná vodivosť spôsobuje väčšie teplotné gradienty vo vnútri nástroja a vyššiu teplotu v oblasti sekundárnej deformačnej zóny, ktorá je zobrazená na obrázku 4 medzi nástrojom a trieskou. Táto vlastnosť má v konečnom dôsledku väčší vplyv na difúzne opotrebovanie. Z tohto dôvodu je vhodnejšie vyhnúť sa vysokým rezným rýchlostiam pri dokončovacích operáciách, pretože by mohli mať za následok prehriatie materiálu [11].



Obr. 4 Deformačné zóny – podľa [12]

Nezanedbateľný vplyv na obrobiteľnosť majú legúry. Všeobecný vplyv legujúcich prvkov je možné vidieť v tabuľke 2.1.

Z údajov v tabuľke vyplýva, že väčšina prvkov, ktoré sa nachádzajú v nehrdzavejúcich oceliach vo výsledku pôsobia negatívne.

Tab. 2.1 Všeobecný vplyv legujúcich prvkov na obrobiteľnosť [6].

Pozitívny vplyv	Negatívny vplyv
Olovo, Síra, Fosfor, Uhlík (0,3 – 0,6 %)	Mangán, Nikel, Kobalt, Chróm, Vanád, Uhlík < 0,3 %, Uhlík > 0,6 %, Molybdén, Volfrám, Niób

2.1 Rozbor obrobiteľnosti austenitických ocelí

Výrobky z austenitickej ocele sú široko využívané v rôznych oblastiach a dopyt po nich je veľký. Preto je otázka ich obrobiteľnosti zásadná. Značný vplyv na proces rezania má ich štruktúra. Rezné nástroje a najmä ich hrany sa rýchlo opotrebovávajú a účinnosť rezania je pomerne nízka. Na dosiahnutie čo najlepšieho možného výsledku je preto treba vybrať vhodný materiál rezného nástroja, geometriu rezného nástroja, rezné parametre, spôsob chladenia a mazania a tiež myslieť na lámavosť triesky. Energia pri rezaní triesok je u austenitických ocelí v priemere o 50 % vyššia ako pri rezaní ocelí typu P [13].

Najznámejším druhom austenitickej ocele je oceľ 18/8 ktorá obsahuje 18 % chrómu a 8 % niklu. Z hľadiska koróziívzdornosti je táto oceľ braná ako základ pre všetky ďalšie typy. Pri požiadavke vyššej odolnosti proti hrdzaveniu a najmä odolnosti proti kyselinám sa do tohto typu pridáva molybdén a to do obsahu 2 %. Ocele týchto skupín sú vhodné aj na obrábanie na automatoch, avšak je potrebné zlepšiť ich obrobiteľnosť pridaním síry alebo selénu. Takto upravené ocele sú ale menej vhodné do korózných prostredí [6].

Tepelné spracovanie je ďalším faktorom ovplyvňujúcim možnosti obrábania. Z podstaty austenitickej ocele je potrebná vysoká rýchlosť ochladzovania, ktorá nasleduje po tepelnom spracovaní a to z dôvodu možného vzniku karbidov chrómu (prevažne Cr₂₃C₆). Vznik týchto abrazívnych karbidov na hraniciach zŕn má za následok zhoršenie obrobiteľnosti [1]. Preto sa tieto ocele žihajú namäkko a rýchlo ochladzujú, alebo žihajú namäkko a ťahajú za studena. Má to síce negatívny vplyv na trvanlivosť reznej hrany nástroja, ale dochádza k zvýšeniu kvality obrobenej plochy [6].

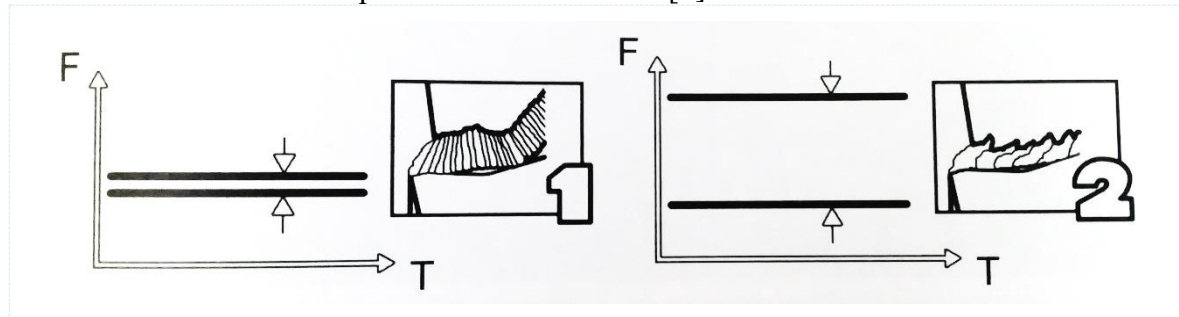
V tabuľke 2.2 je porovnávaná oceľ C45 (ekvivalentom v označení podľa normy ČSN je oceľ 12 050) s oceľou ICr18Ni9Ti.

Tab. 2.2 Porovnanie mechanických vlastností a obrobiteľnosti [13].

Typ ocele	Tvrdosť [HBS]	Pevnosť v ťahu R _m [MPa]	Predĺženie A [%]	Koeficient tepelnej vodivosti λ [W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	Obrobiteľnosť
12 050	≤ 229	600 ≥	≥ 16	67,78	jednoduchšia
ICr18Ni9Ti	≤ 187	540 ≥	≥ 45	16,74	náročnejšia

Z tabuľky 2.2 vyplýva, že nízke hodnoty koeficientu tepelnej vodivosti negatívne ovplyvňujú obrobiteľnosť. V kombinácii s vyššou húževnatosťou austenitických ocelí je výsledkom fakt, že trieska sa nedá ľahko zvinúť a zlomiť. Dochádza k jej trhaniu a namotávaní na obrobok. Tento jav ma negatívny vplyv na výsledný povrch obrobku a môže zapríčiniť až ulomenie nástroja. Pre požadovanú kvalitu povrchu je preto treba tejto otázke klásť dostatočný dôraz [13].

Na rozdiel od uhlíkovej ocele, pri ktorej je pri obrábaní najväčšia časť tepla odvádzaná trieskou, u austenitických ocelí, ktorých tepelná vodivosť je podstatne nižšia, je veľká časť generovaného tepla odvádzaná nástrojom. Na výsledný obrobený povrch majú vplyv aj zmeny reznej sily. Zatiaľ čo pri nelegovanej oceli je možné pozorovať kontinuálnejší proces utvárania triesky, pri austenitickej oceli vzniká skôr lamelovitý a nepravidelný tvar. Výsledný obrobený povrch je preto vlnitejší ako pri nelegovaných oceliach. Názorný rozdiel vo výkyvoch v hodnotách reznej sily je viditeľný na obrázku 5. Obrázok naľavo predstavuje uhlíkovú oceľ a obrázok napravo oceľ austenitickú [6].



Obr. 5 Rozdiel vo výkyvoch reznej sily [6].

Obrobiteľnosť austenitických a celkovo nehrdzavejúcich ocelí je komplexný problém. Pri obrábaní je vhodné voliť pozitívny uhol reznej hrany nástroja, nakoľko na obrobených plochách existuje možnosť vytvorenia vrstvy hrubej cca 0,1 mm s tvrdosťou 450 ± 50 HB, ktorá vzniká vplyvom plastickej deformácie a za studena sa vytvrdzuje. Negatívna geometria nástroja, alebo jeho otupenie má nepriaznivý vplyv na hrúbku vytvrzenej vrstvy. Pozitívny uhol reznej hrany nástroja je vhodnejší aj z hľadiska plynulosti obrábania a rovnomernejšieho rozloženia teploty. Vo zvýšenej miere je potrebné dbať na upnutie nástroja, tuhosť stroja a jeho stabilitu a spoľahlivosť chodu vretena [6].

V súčasnej dobe môžeme pozorovať snahu o zlepšenie obrobiteľnosti u nehrdzavejúcich ocelí, a to najmä prostredníctvom legúr. Je známe, že síra a selén pozitívne ovplyvňujú túto vlastnosť. Okrem nich majú priaznivý vplyv aj mäkké prísady oxidov, vďaka ktorým dochádza k lepšiemu utváraníu triesky a pri vysokých rezných rýchlostiach fungujú aj ako mazivo. Ďalšími prvkami ovplyvňujúcimi obrobiteľnosť sú olovo a telúr, avšak v dnešnej dobe je snaha o minimalizáciu používania olova pre jeho zdravotnú závadnosť. Vylúčiť ho ale v niektorých prípadoch nejde a to kvôli jeho vplyvu na lámavosť triesky. Z hľadiska možných prísad sa ukazuje vhodnosť použitia bizmutu v kombinácii s meďou, ktoré by v budúcnosti mohli úplne nahradiť olovo a telúr [14].

V tabuľke 2.3 je chemické zloženie dvoch typov austenitických ocelí, pričom do oceli B bola navyše pridaná meď a bizmut.

Tab. 2.3 Chemické zloženia (hmotnostné %) dvoch typov austenitických ocelí [14].

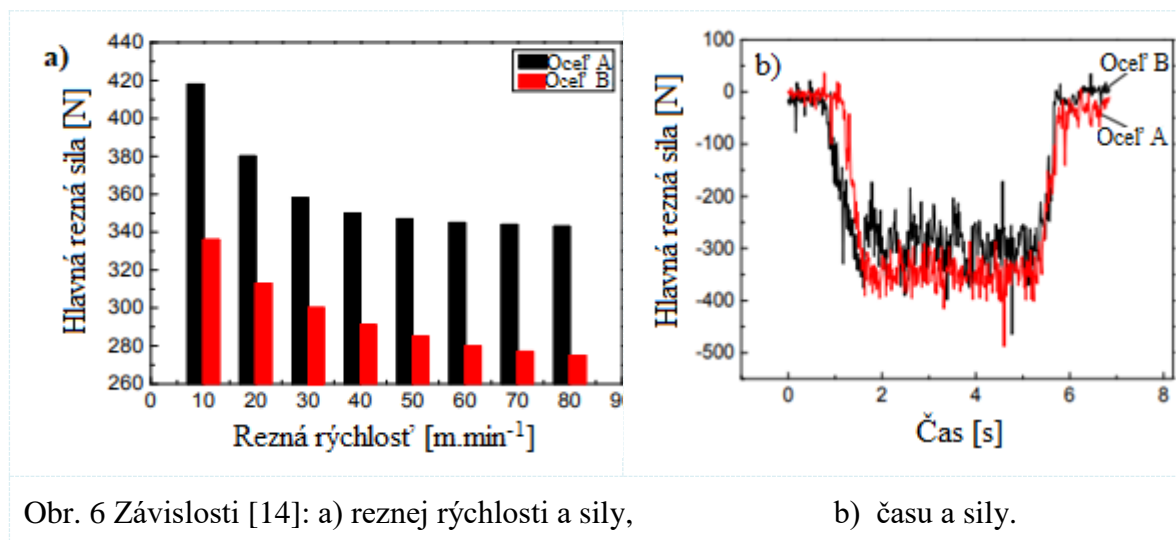
Oceľ	C	Si	Mn	S	P	Ni	Cr	Ti	Cu	Bi
A	0,11	0,09	0,50	0,02	0,02	10,15	17,87	0,55	-	-
B	0,10	0,08	1,54	0,11	0,02	9,34	18,65	0,78	1,97	0,13

V tabuľke 2.4 je uvedené porovnanie mechanických vlastností oboch typov ocelí.

Tab. 2.4 Porovnanie mechanických vlastností [14].

Mechanické vlastnosti	Pevnosť v ťahu	Celkové predĺženie	Modul pružnosti
Oceľ A	675 MPa	55 %	148,7 GPa
Oceľ B	520 MPa	49 %	145,6 GPa

Z tabuľky 2.4 vyplýva, že pri oceli B je pevnosť v ťahu výrazne nižšia ako pri oceli A. Pri austenitických oceliach je to práve odolnosť proti korózií a pevnosť v ťahu, ktoré v najväčšej miere zapríčínajú horšiu obrábateľnosť. Výsledný vplyv rýchlosti rezania na hlavnú reznú silu je uvedený na obrázku 6a. Na obrázku 6b je možné vidieť závislosť reznej sily na čase obrábania pri rýchlosti rezania $40 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pre oba obrázky platí, že posuv na otáčku $f = 0,2 \text{ mm}$ a šírka záberu hlavného ostria $a_p = 0,5 \text{ mm}$.



Obr. 6 Závislosti [14]: a) reznej rýchlosti a sily,

b) času a sily.

2.2 Materiál rezného nástroja

V súčasnej dobe je na výber široká škála nástrojových materiálov. Dôležitý vplyv na výber materiálu nástroja majú rezné podmienky. Vo všeobecnosti platí, že pri požiadavke vyššej húževnatosti a posuvovej rýchlosti sú vhodné spekané karbidy s vyšším obsahom spojujúceho kovu. Pri potrebe tvrdších nástrojových materiálov a vyššej reznej rýchlosti volíme naopak spekané karbidy s nízkym obsahom spojujúceho kovu, alebo polykrystalický kubický nitrid bóru (PKNB). Medzi týmito materiálmi sa ďalej nachádzajú, či už povlakované alebo nepovlakované cermety, rezná keramika a ďalšie. Snahou je zvyšovanie hodnôt rezných parametrov, ako sú posuvová rýchlosť alebo rezná rýchlosť, čo sa v súčasnej dobe uskutočňuje najmä ich povlakovaním.

Všeobecne je možné nástrojové materiály rozdeliť do nasledujúcich skupín [15]:

- rýchlorezné ocele,
- spekané karbidy,

- cermety,
- rezná keramika,
- supertvrde materiály – (PKNB).

Vhodnosť spomenutých materiálov na obrábanie nerezových ocelí sa líši. Za následok to majú vlastnosti materiálov a vlastnosti samotnej ocele.

Charakteristika a použiteľnosť jednotlivých materiálov na obrábanie:

- a) Rýchlorezné ocele sú vhodné na obrábanie koróziívzdorných ocelí vďaka svojej húževnatosti, možnosti vysokej posuvovej rýchlosti a taktiež cene. Výhodou je tiež možnosť obnovenia povlakov, kedy sa starý povlak odstráni, nástroj sa obrúsi a znova napovlakuje. Negatívom je, že nástroj si nezachováva tvrdosť pri vyšších rezných rýchlostiach. Z uvedených charakteristík vyplýva, že tento nástroj je vhodný skôr na hrubovacie operácie [16];
- b) Spekané karbidy sú v dnešnej dobe pravidelne používanými reznými materiálmi a platí to aj pri nehrdzavejúcich oceliach. Oproti rýchlorezným oceliam majú výhodu v tom, že materiál je schopný zachovávať si tvrdosť aj pri vyšších rezných rýchlostiach. Najvhodnejšími sú gradientné spekané karbidy v kombinácii s CVD povlakom [6,17];
- c) Cermety sú kombináciou kovu a keramiky na báze titanu. Sú odolné proti oteru, plastickej deformácii a ich húževnatosť je daná množstvom kobaltu. V porovnaní so spekanými karbidmi majú cermety menší sklon k tvorbe nárazku, ale nižšiu odolnosť proti vzniku tepelných trhlin. Častejšie sa využíva PVD povlakovanie. Vďaka menšiemu sklonu k tvorbe nárazku sú vhodné na dokončovacie práce pri obrábaní koróziívzdorných ocelí [17];
- d) Keramický rezný nástroj má dobré mechanické aj chemické vlastnosti, najmä pri vysokých teplotách, ako je vysoká odolnosť voči opotrebeniu, relatívne nízka chemická reaktivita s oceľami a mnohými ďalšími materiálmi a vysokou tvrdosťou. Pre keramické rezné nástroje na báze Al_2O_3 navyše prítomnosť Al_2O_3 v reznom nástroji pomáha znižovať príľnavosť materiálu obrobku k povrchu rezného nástroja. Tieto vlastnosti keramického rezného nástroja umožňujú obrábať tvrdé materiály obrobkov, ako sú nehrdzavejúce ocele a vysokoteplotné zliatiny so zvýšenou rýchlosťou odstraňovania triesky a dlhšou životnosťou nástroja [18];
- e) Polykryštalický kubický nitrid bóru (PKNB) a polykryštalický diamant (PD) patria medzi supertvrde materiály. Rezným nástrojom z PKNB sa však odporúča obrábať materiály, ktoré majú tvrdosť vyššiu ako 48 HRC, ako sú napríklad kalené ocele, žiaruvzdorné liatiny alebo martenzitické ocele. V opačnom prípade dochádza k veľkému opotrebeniu reznej hrany nástroja. PD, ako najtvrdší rezný nástroj, ktorého tvrdosť sa blíži prírodnému monokryštalickému diamantu, nie je vhodný na obrábanie železných materiálov kvôli jeho afinite k uhlíku [6].

2.2.1 Povlakovanie

Ako bolo spomenuté v kapitole 2.2, v dnešnej dobe existuje snaha o zvyšovanie hodnôt rezných podmienok. Toto sa deje najmä prostredníctvom povlakovania.

Povlaky je možné z hľadiska vývoja rozdeliť na 4 generácie [15]:

1. generácia – jedná sa o povlaky jednovrstvové z karbidu titanu (TiC), vyznačovali sa zlou príľnavosťou aj súdržnosťou podkladu a povlaku,
2. generácia – povlaky sú dokonalejšie a hrubšie, majú vyššiu príľnavosť, okrem TiC prichádza aj TiN a TiCN,
3. generácia – viacvrstvové povlaky (2-3), u ktorých je jasné oddelenie a radenie vrstiev,
4. generácia – 10 a viac vrstiev povlakov, vrstvy sa radia účelne, menej zreteľné oddelenie vrstiev ako v tretej generácii.

Existuje viacero metód nanášania povlakov. Medzi najznámejšie patria PVD a CVD. Ďalšie metódy sú MTCVD, ktorá sa od CVD líši nižšou teplotou naparovania alebo PACVD. Obvykle používanými sú metódy PVD a CVD.

Pri použití metódy PVD sa aplikujú povlaky o hrúbke 1–5 μm a tvrdosti 1500–4000 HV. Je možné použitie množstva kombinácií rôznych materiálov. Najčastejšie používané sú povlaky založené na báze titanu, hliníku, chrómu, kremíku a ďalších. Povlakovacia teplota je nižšia ako pri metóde CVD a to od 180 do 550 $^{\circ}\text{C}$. Zostatkové napätie v povlaku je tlakové. Oba tieto faktory pôsobia pozitívne, nakoľko nižšia teplota v menšej miere ovplyvňuje povlakovaný materiál a zostatkové tlakové napätia pôsobia proti vzniku trhlín. Pri dokončovaní koróziívzdorných ocelí je PVD povlak vhodnejší, pretože narozdiel od CVD povlaku sme schopný dosiahnuť ostrejšiu hranu rezného nástroja a vyšší stupeň húževnatosti. Nevýhodou je, že nástroj sa pri procese povlakovania musí pohybovať a nie je možné povlakovať diery a štrbiny [19,20].

Metódou CVD sú nanášané povlaky v hrúbke 4–20 μm a s hodnotou tvrdosti najčastejšie okolo 2000 HV. Najviac využívané materiály povlakov sú Al_2O_3 , TiN, TiC, TiCN. Často sa skladajú z viacerých vrstiev. Vrstvy Ti(C,N) majú vysokú odolnosť proti opotrebeniu, zatiaľ čo vrstvy Al_2O_3 sú odolné proti vysokým teplotám. Nevýhodou tejto metódy je vznik ťahových napätí v povlaku, nutnosť zušľachtovania ocelových nástrojov až po povlakovaní, alebo vyššia energetická náročnosť daná vyššou teplotou, pri ktorej tento proces prebieha (800–1000 $^{\circ}\text{C}$). Nástroje povlakované CVD metódou sú odolnejšie proti opotrebeniu, no menej vhodné na obrábanie nerezových ocelí a to z dôvodu nemožnosti povlakovať ostré hrany [19,20].

2.3 Geometria rezného nástroja

Rezný nástroj je väčšinou charakterizovaný pomocou jeho uhlov. Vývojom sa dosahujú stále zložitejšie geometrie. Pri reznom nástroji rozlišujeme makrogeometriu a mikrogeometriu. Zatiaľ čo mikrogeometria sa zaoberá hlavne konštrukciou reznej hrany nástroja, makrogeometria sa zaoberá hlavnými charakteristikami nástroja. Geometria významne ovplyvňuje rezný proces a preto je treba ju voliť čo najvhodnejšie [20].

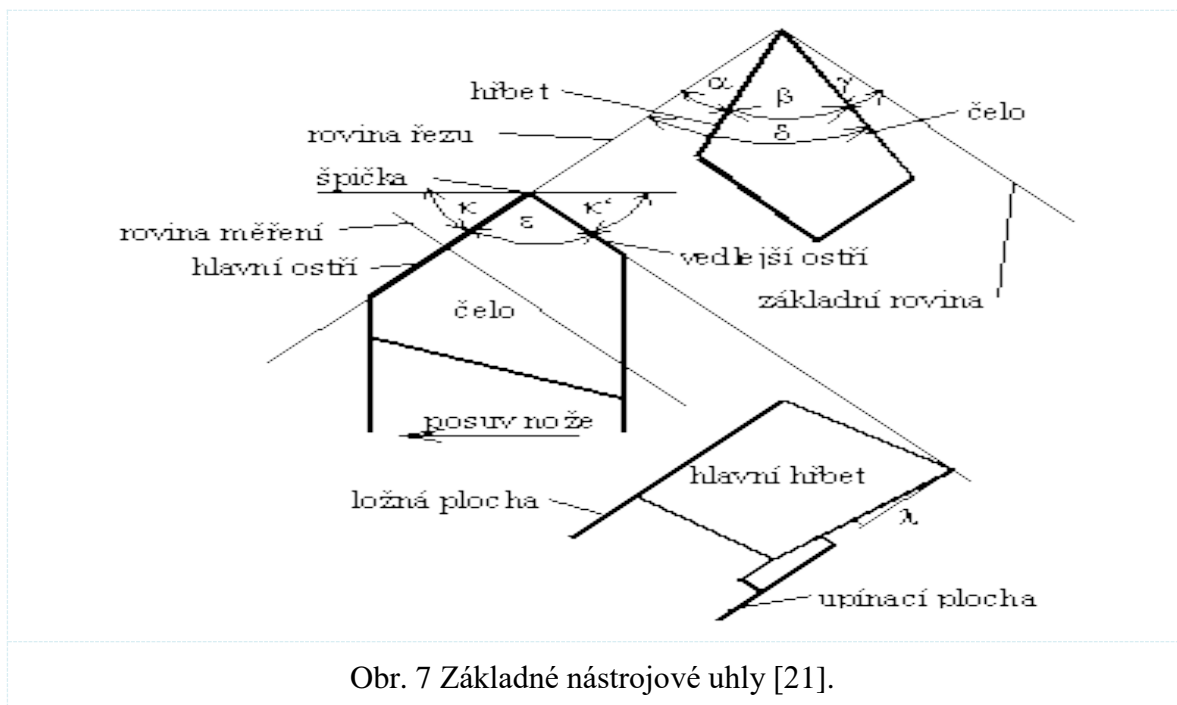
Základné uhly, ktoré na nástroji rozoznávame sú:

- α – uhol chrbta,

- β – uhol reznej hrany nástroja,
- γ – uhol čela,
- ε – uhol špičky,
- λ – uhol sklonu ostria,
- κ – uhol nastavenia hlavného ostria,
- κ' – uhol nastavenia vedľajšieho ostria,
- r – polomer špičky.

Nastavenie týchto uhlov sa pre rôzne druhy operácií a rôzne materiály obrobkov líši. Pri austenitických oceliach existuje viacero obmedzení. Je odporúčané vyhnúť sa príliš veľkému polomeru špičky z dôvodu možného vzniku vibrácií. Príliš malý polomer špičky zase môže spôsobiť vznik plastickej deformácie na nástroji. Správna voľba tohto rozmeru má za následok minimalizáciu rezných síl. Uhol nastavenia hlavného ostria by mal byť menší ako 90° , v opačnom prípade môže dôjsť k rýchlemu opotrebeniu na chrbte. Uhol čela aj chrbta sa odporúča voliť pozitívny [6].

Základné uhly popisujúce nástroj sú vidieť na obrázku 7.



Obr. 7 Základné nástrojové uhly [21].

2.4 Rezné prostredie

Hospodárnosť obrábania závisí nielen od voľby rezných podmienok, ale aj od voľby rezného prostredia. Vplyv rezných kvapalín je dlhodobo známy a výskum v tejto oblasti neustále napreduje. Od rezných kvapalín je vyžadované aby mali tieto vlastnosti [22]:

- chladiaci účinok,
- mazací účinok,
- čistiaci účinok,

- prevádzkovú stálosť,
- ochranný účinok,
- zdravotnú nezávadnosť,
- požadujú sa nízke náklady.

Miesta, kde vzniká teplo pri rezaní materiálu sa nachádzajú tam, kde dochádza k premene deformačnej práce a trenia. Intenzita vývinu tepla sa mení s geometriou nástroja, reznými podmienkami, vlastnosťami obrábaného materiálu a ďalšími vplyvmi. Vzťah 2.1 udáva tepelnú bilanciu v mieste rezania.

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 \quad (2.1)$$

Kde [22]:

- Q [J] – celkové množstvo vzniknutého tepla,
- Q₁ [J] – množstvo tepla odvedené v trieske,
- Q₂ [J] – množstvo tepla zostávajúceho v nástroji,
- Q₃ [J] – množstvo tepla zostávajúceho v obrobku,
- Q₄ [J] – množstvo tepla odvedeného do okolia.

Zlá tepelná vodivosť austenitických ocelí má za následok, že teplo odvádzané trieskou je menšie a preto vo väčšej miere vstupuje do nástroja. Otázka použitia procesnej kvapaliny je preto na mieste. Narozdiel od bežných obrábacích operácií, kde sú v olejovodnej emulzii 3–4 % oleja, je výhodnejšie aby mala procesná kvapalina pri obrábaní austenitickej ocele vysokú kvalitu s obsahom oleja 8–9 %. Procesnú kvapalinu je lepšie do miesta rezu privádzať pod tlakom, chladenie je tak efektívnejšie [23].

Vývoj v oblasti procesných kvapalín sa zameriava momentálne najmä na hľadisko ich ekologickosti. Minerálne, syntetické a polosyntetické procesné kvapaliny môžu mať negatívny vplyv na zdravie ľudí a životné prostredie. Najmä keď sa vyparujú a distribuujú v podobe pár, mikročastice môžu spôsobovať ochorenia ako rakovina pľúc, genetické či dermatologické ochorenia. Ako možná náhrada sa javia procesné kvapaliny na báze zeleniny (VBCF). Ich výhodou je najmä to, že sú menej toxické, šetrné k životnému prostrediu, obnoviteľné a náklady na spracovanie odpadu z nich sú nižšie. Na druhej strane negatívami sú nízka tepelná a oxidačná stabilita. Testy VBCF pri sústružení austenitickej ocele 1.4306 ukázali, že pri pokračujúcom výskume v oblasti ich zloženia majú potenciál v budúcnosti nahradiť dnes najčastejšie používané procesné kvapaliny [24].

3 METÓDY VYHODNOCOVANIA VRSTIEV PO OBRÁBANÍ

Znalosť toho, akým spôsobom bol povrch súčasti vytváraný má zásadný význam pre pochopenie výsledných vlastností vzniknutého povrchu. Zmeny, ktoré nastávajú pri tvorbe novej povrchovej vrstvy je možné nazvať zmenami akosti. Súvislosti a vzájomné prepojenia medzi jednotlivými vlastnosťami povrchu sú označované ako integrita povrchu [25].

Medzi hodnotené vlastnosti povrchu patria [25]:

- drsnosť povrchu,
- vizuálne skúšky,
- skúšky mikrotvrdości (nanotvrdości),
- stanovenie únavovej pevnosti,
- stanovenie korózných vlastností,
- metalografické hodnotenie.

3.1 Nanointendačné skúšky

Medzi známe a často využívané merania tvrdosti patria skúšky podľa Brinella, Vickersa alebo Rockwella. Rozdiely medzi nimi sú v použitých tvaroch a materiáloch intendorov, zaťažovacích dobách, alebo v samotnej zaťažovacej sile. Vickersovou metódou je možné aj meranie mikrotvrdości, čo ostatné spomínané metódy neumožňujú. Metóda na meranie tvrdosti využitá v experimentálnej časti tejto práce umožňuje dostať sa na nano úroveň a tým dosiahnuť presnejších výsledkov, ako je tomu pri meraní mikrotvrdości podľa Vickersa. Hlavný rozdiel medzi meraním tvrdosti na nano a mikro úrovni je v počte vpichov intendora, ktoré je možné na určitú oblasť aplikovať. V prípade tenšej ovplyvnenej povrchovej vrstvy je možné získať presnejšie výsledky [26].

3.1.1 Princíp merania nanomechanickým prístrojom

V experimente je nanotvrdosť meraná pomocou nanomechanického testovacieho prístroja **Hysitron TI 950 Tribointender**. Intendorom je v tomto prípade zrezaná hrana kocky (Cube Corner) a jeho materiálom je diamant. Skúška je inštrumentovaná (meria sa priebeh sily počas celej doby zaťažovania aj odľahčovania), z výsledného grafu je preto prístroj schopný vypočítať redukovaný modul pružnosti vid' vzťah (3.1) aj nanotvrdosť [26].

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \mu_s^2}{E_s} + \frac{1 - \mu_i^2}{E_i} \quad (3.1)$$

Kde [26]:

E_r [GPa] – redukovaný modul pružnosti,

E_s [GPa] – modul pružnosti testovaného materiálu,

E_i [GPa] – modul pružnosti intendora,

μ_s [-] – Poissonovo číslo testovaného materiálu,

μ_i [-] – Poissonovo číslo intendora.

Nanomechanický prístroj Hysitron TI 950 Tribointender je zobrazený na obrázku 8.

Metalografické vzorky pre experiment na nanomechanickom prístroji Hysitron boli najskôr vybrúsené, následne vyleštené a zaliate do modrého bakelitu, ktorý sa oproti čiernemu vyznačuje lepšou príľnavosťou k vzorku. Pripravené vzorky zobrazuje obrázok 9.



Obr. 8 Hysitron TI 950 Tribointender.

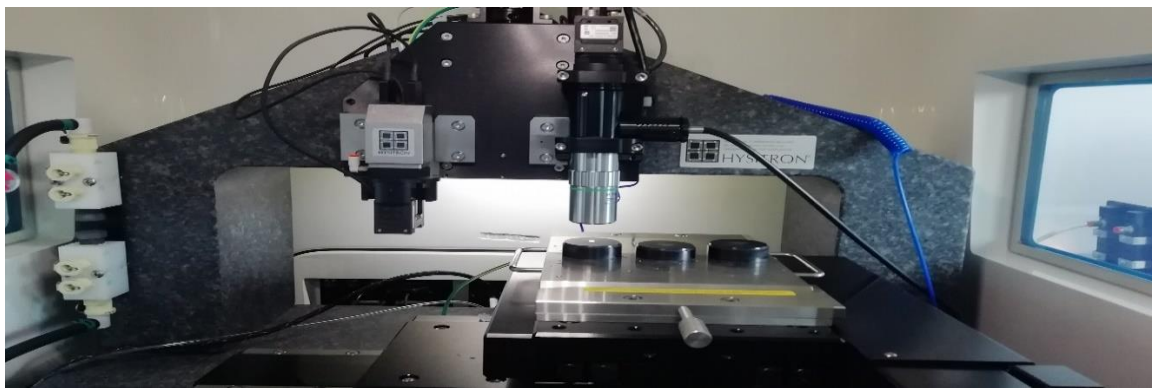


Obr. 9 Metalografické vzorky.

Samotné meranie prebieha v troch fázach [26]:

1. V prvej fáze je pomocou optického mikroskopu vyhládané miesto vlastného merania (Boundary);
2. V druhej fáze sa pri malom zaťažení preskenuje vybrané miesto merania pomocou SPM metódy (*Scanning Probe Microscopy*);
3. V tretej fáze je následne navolený požadovaný počet vpichov a prebehne vlastné meranie.

Doba aj veľkosť záťaže je závislá od typu skúmaného materiálu. Čas záťaže sa pohybuje od 2 do 5 sekúnd, sila spravidla do 5000 μN . Na obrázku 10 je hlavná časť meracieho zariadenia Hysitronu [26].



Obr. 10 Hlavná časť meracieho zariadenia.

3.2 Hodnotenie štruktúry povrchu

Parametre charakteru povrchu sú definované v pravouhlom súradnicovom systéme. V ňom osi vytvárajú pravotočivý karteziánsky systém, kde [10]:

- stredná čiara profilu súhlasí s osou X, táto os leží v smere snímania,
- os Y leží na skutočnom povrchu a je kolmá na os X,
- os Z smeruje von z povrchu.

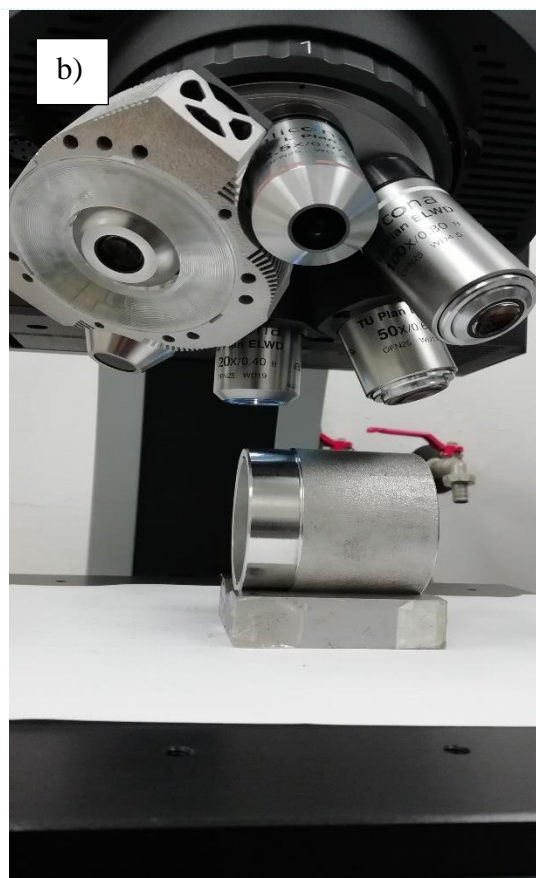
Profily sa delia na profily s dlhými vlnovými dĺžkami a s krátkymi vlnovými dĺžkami. Rozdelené sú pomocou filtra profilu. Využívané sú filtre na meranie parametrov primárneho profilu, profilu drsnosti a profilu vlnitosti [10].

Moderným systémom, ktorý je schopný merať parametre tvaru aj drsnosti je 3D mikro-súradnicový systém InfiniteFocus G5. Vertikálne rozlíšenie je do 10 nm, vďaka čomu je schopný presne analyzovať povrch homogénnych aj zmiešaných materiálov. Systém produkuje presné topografické informácie v pravých farbách pomocou vertikálneho skenovania a malej hĺbky ostrosti. Presné umiestnenie vzorky je zabezpečené snímačmi umiestnenými v každej osi. Vďaka softvéru Alicona je merania možné jednoducho opakovať, porovnávať a overovať [27].

System Alicona InfiniteFocus G5 je zobrazený na obrázku 11a. Obrázok 11b zobrazuje časť prístroja určenú na samotné meranie.



Obr. 11a) Alicona InfiniteFocus G5,



b) Meracie zariadenie.

Kvôli nastaveniu systému Alicona InfiniteFocus G5 boli na jednotlivých vzorkách ocelí dopredu vykonané merania na dielenskom drsnomeri TR100 Surface Roughness Tester.

4 EXPERIMENTÁLNA ČASŤ

Vstupným materiálom pre experimentálnu časť práce bola dutá kruhová austenitická oceľ s označením 1.4541. Daný materiál je vhodný pre menej korózne zaťažené zariadenia v chemickom, papierenskom a potravinárskom priemysle, pre zvarané konštrukcie a zásobníky [28].

V tabuľke 4.1 je uvedené chemické zloženie a v tabuľke 4.2 je prehľad základných informácií o danej oceli.

Tab. 4.1 Chemické zloženie.

Značka prvku	C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr	Ti	N
Množstvo [%]	0,046	1,72	0,390	0,020	0,001	10,70	17,30	0,400	0,0165

Tab. 4.2 Základné informácie.

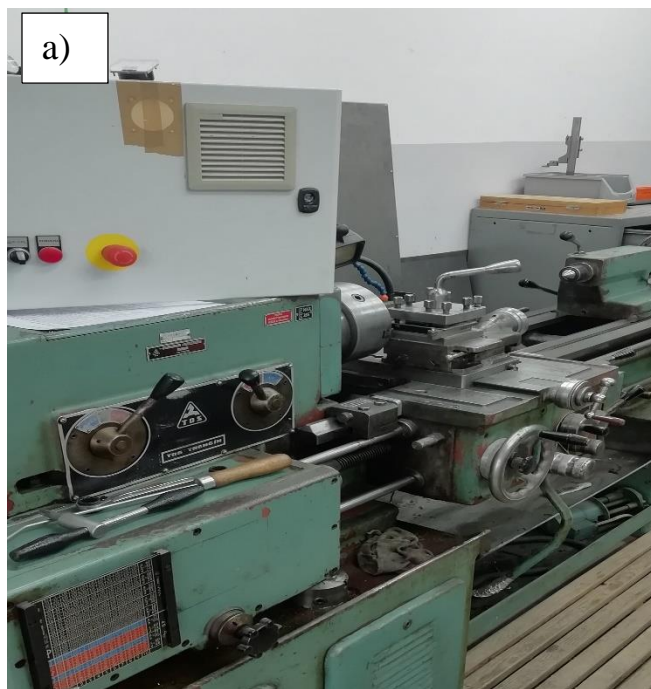
Tepelné spracovanie	výdrž na 1060 °C, 10 minút, chladené vodou	
Tvrdosť [HRB]	76	
Veľkosť zrna	7	
Údaje zo skúšky ťahom pri teplote $T = 20\text{ °C}$		
Zmluvná medza klzu $R_{p0.2}$ [MPa]	Pevnosť v ťahu R_m [MPa]	Ťažnosť A [%]
234	545	44

Od vstupného materiálu sa odvíjal aj samotný návrh skúšky v nasledujúcich bodoch:

- výber obrábacieho stroja,
- výber rezného nástroja,
- zjednotenie rozmerov skúšobných vzoriek,
- voľba rezných podmienok,
- zhodnotenie výsledných vlastností.

4.1 Výber obrábacieho stroja

V rámci experimentu bol s ohľadom na vstupný materiál zvolený ako obrábací stroj hrotový sústruh TOS Trenčín SV18RD s elektromotorom o výkone 5,5 kW, viď obrázok 12a. Stroj bol prerobený na asynchrónny motor s frekvenčným meničom, ktorý zabezpečoval zmenu otáčok vretena. Frekvenčný menič bol vybavený displejom s možnosťou odčítavania výkonu a je zobrazený na obrázku 12b.



Obr. 12a) Sústruh TOS Trenčín SV18RD,



b) Frekvenčný menič.

Pre experiment bolo zvolené pozdĺžne sústruženie. Meranie drsnosti povrchu prebehlo v rovnobežnom smere s posuvovou rýchlosťou. Vplyvom zvyšovania hlavnej reznej rýchlosti bolo predpokladané znižovanie drsnosti povrchu [29,30].

4.2 Výber rezného nástroja

Nástrojom zvoleným na experiment na základe vyššie uvedených kapitol a odporúčaní k obrábaniu austenitickej ocele je v našom prípade sústružnícka nástrojová doštička od firmy SANDVIK Coromant s označením SNMG 12 04 08-MF 2220 vyrobená zo spekaného karbidu, ktorá patrí do aplikačnej skupiny M. Týmto nástrojom je možné dokončovať materiály, medzi ktoré patrí aj austenitická oceľ.

Základné informácie o nástrojovej doštičke:

- účinná dĺžka reznej hrany – 11,9 mm,
- polomer rohu (špičky) – 0,794 mm,
- základný materiál – HC (povlakovaný spekaný karbid),
- neutrálny uhol chrbta,
- hmotnosť – 0,008 kg,
- povlak CVD Ti(C,N) + Al₂O₃ + TiN.

Uhol nastavenia hlavného ostria v našom prípade je $\kappa = 45^\circ$. Uhol chrbta je neutrálny, čo je v rozpore s predošlými kapitolami, avšak pri obrábaní je vďaka sklopeniu v držiaku pozitívny, čo korešponduje s odporúčaniami.

Výrobcom odporúčané hodnoty rezných parametrov udáva tabuľka 4.3.

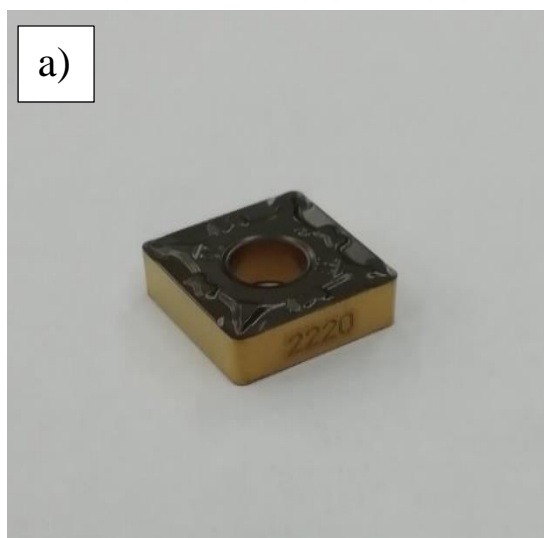
Tab. 4.3 Odporúčané hodnoty rezných parametrov.

	Šírka záberu ostria a_p [mm]	Posuv na otáčku f [mm]	Rezná rýchlosť v_c [m.min ⁻¹]
Minimálna hodnota	0,15	0,1	165
Maximálna hodnota	1,5	0,41	285
Optimálna hodnota	0,6	0,21	230

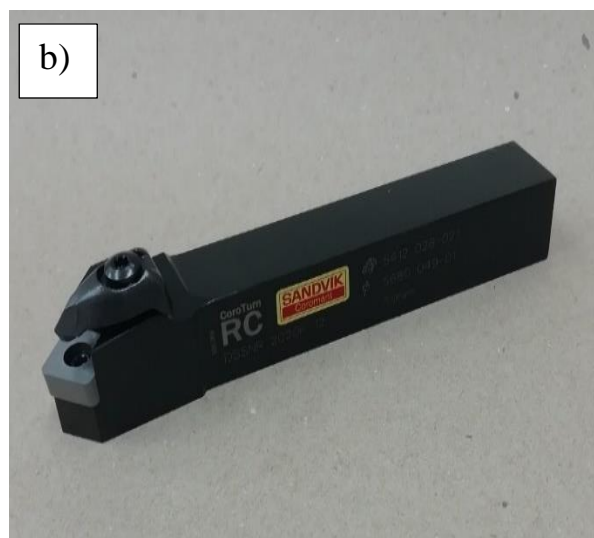
Nástroj je povlakovaný CVD povlakom. Jednotlivé povlakované vrstvy majú nasledovné funkcie [31]:

- vrstva TiCN – hlavnou úlohou tejto vrstvy je zvýšenie odolnosti nástroja proti mechanickému opotrebeniu,
- vrstva Al₂O₃ – zabezpečuje vyššiu odolnosť proti adhézemu a difúznemu opotrebeniu, umožňuje použitie vysokých rezných rýchlostí, znižuje drsnosť,
- vrstva TiN – zabezpečuje odolnosť proti oxidácií a znižuje koeficient trenia.

Zvolený nástroj je upnutý pomocou stopkového sústružníckeho držiaku od firmy SANDVIK Coromant s označením DSSNR 2020K 12. Na obrázku 13a je vidieť zvolený rezný nástroj a na obrázku 13b je zobrazený použitý nástrojový držiak.



Obr. 13a) Rezný nástroj,

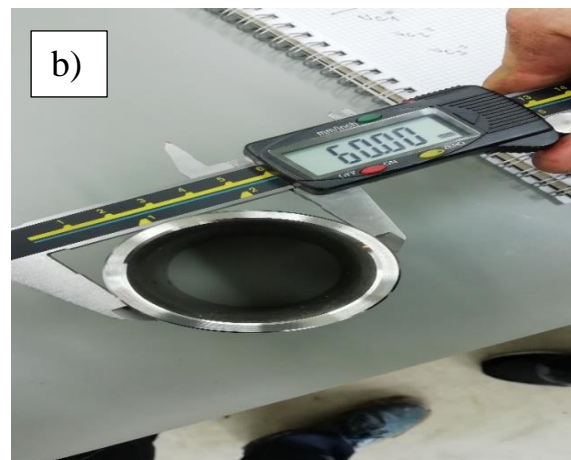


b) Nástrojový držiak.

4.3 Príprava vzoriek

Dodávateľom udaný priemer 60,30 mm sa pri jednotlivých vzorkách mierne líšil. Pre potreby experimentu bol vstupný materiál rozrezaný na 3 časti a následne boli

jednotlivé vzorky osústružené na jednotný priemer 60 mm. Na obrázku 14a je zobrazené rezanie vzoriek, na obrázku 14b je jedna zo vzoriek pripravená na samotný experiment.



Obr. 14a) Rezanie vzoriek,

b) Pripravená vzorka.

4.4 Rezné podmienky

Pri experimente bola menená hodnota reznej rýchlosti, nakoľko vplyvom jej zmien bolo predpokladané najvýraznejšie deformačné spevnenie jednotlivých vzoriek [26].

Chladienie vzoriek pri sústružení bolo zabezpečené olejovodnou emulziou s 8 % polosyntetickej procesnej kvapaliny Castrol HYSOL MB50. V tabuľke 4.4 sú uvedené nastavenia rezných podmienok pri jednotlivých vzorkách.

Tab. 4.4 Rezné podmienky.

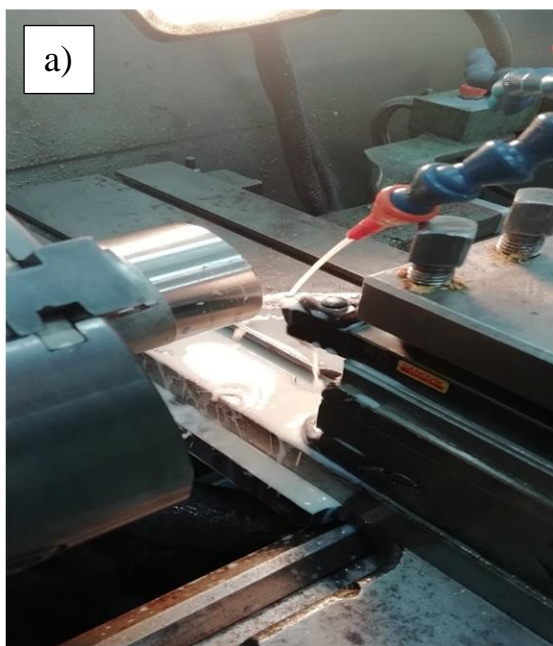
Parameter sústrużenia	Číslo vzorky		
	Vzorka 1.	Vzorka 2.	Vzorka 3.
Šírka záberu ostria a_p [mm]	0,5	0,5	0,5
Posuv na otáčku f [mm]	0,215	0,215	0,215
Otáčky n [min^{-1}]	530	1060	1590
Rezná rýchlosť v_c [$\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$]	100	200	300
Frekvencia f [Hz]	29,40	58,90	88,30

V tabuľke 4.5 je uvedený výkon, ktorý bol potrebný na osústruženie jednotlivých vzoriek.

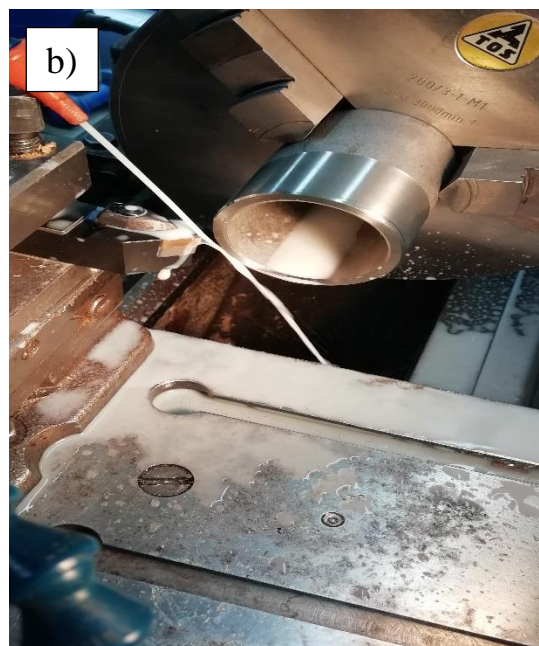
Tabuľka 4.5 Výkon pri sústružení.

Číslo vzorky	Vzorka 1.	Vzorka 2.	Vzorka 3.
Výkon P [W]	980	1800	2820

Na obrázkoch 15a a 15b je zobrazený priebeh experimentu.



Obr. 15a) Priebeh experimentu 1,



b) Priebeh experimentu 2.

5 VÝSLEDKY EXPERIMENTU

5.1 Výsledné profily drsnosti a vlnitosti

Jednotlivé parametre drsnosti profilu získané z merania na systéme InfiniteFocus G5 sú uvedené v tabuľke 5.1.

Tab. 5.1 Hodnoty parametrov drsnosti.

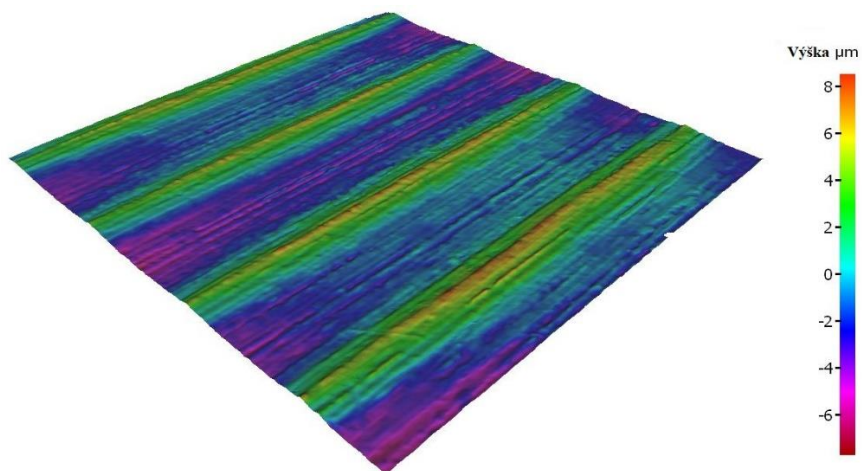
Označenie parametra drsnosti	Číslo vzorky			Názov parametra drsnosti
	1.	2.	3.	
Ra [μm]	2,190	2,156	2,304	Priemerná aritmetická úchylka profilu drsnosti
Rq [μm]	2,644	2,650	2,683	Priemerná kvadratická úchylka profilu drsnosti
Rt [μm]	13,569	12,367	11,405	Celková výška profilu drsnosti
Rz [μm]	13,140	12,009	11,019	Najväčšia výška profilu drsnosti
Rp [μm]	8,063	7,364	6,929	Výška najväčšieho výstupku profilu drsnosti
Rv [μm]	5,507	5,003	4,475	Hĺbka najväčšej priehlbiny profilu drsnosti

Parametre vlnitosti sú uvedené v tabuľke 5.2.

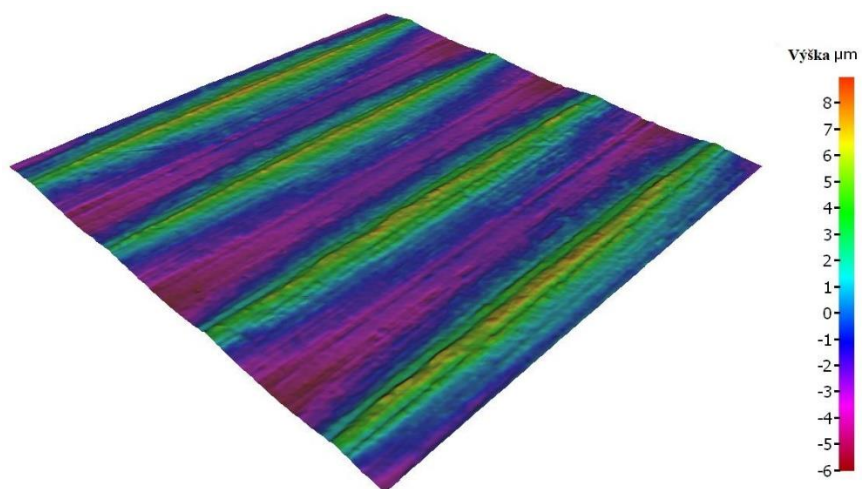
Tab. 5.2 Hodnoty parametrov vlnitosti.

Označenie parametra vlnitosti	Číslo vzorky			Názov parametra vlnitosti
	1.	2.	3.	
Wa [μm]	0,351	0,164	0,252	Priemerná aritmetická úchylka profilu vlnitosti
Wq [μm]	0,442	0,206	0,320	Priemerná kvadratická úchylka profilu vlnitosti
Wt [μm]	1,796	0,770	1,124	Celková výška profilu vlnitosti
Wz [μm]	1,228	0,689	0,762	Najväčšia výška profilu vlnitosti
Wp [μm]	0,888	0,365	0,509	Výška najväčšieho výstupku profilu vlnitosti
Wv [μm]	0,908	0,405	0,615	Hĺbka najväčšej priehlbiny profilu vlnitosti

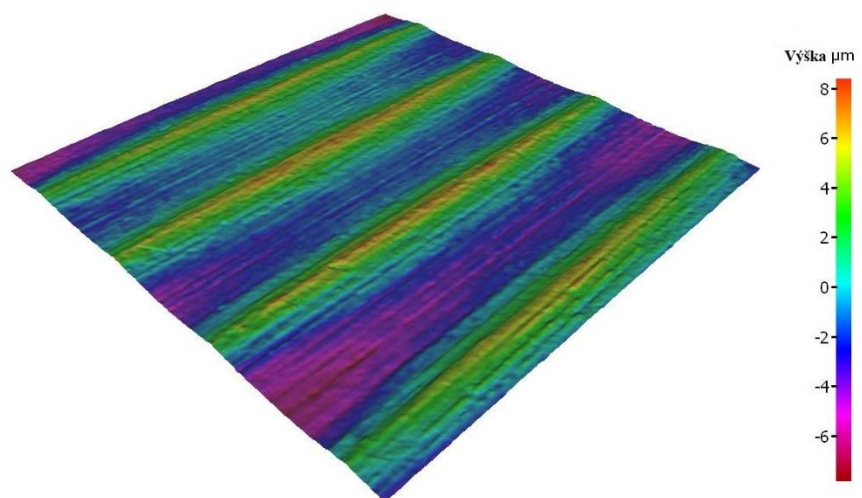
Na obrázkoch 16, 17 a 18 sú zobrazené 3D pohľady na jednotlivé vzorky s farebným rozlíšením výšok.



Obr. 16 3D Povrch vzorky číslo 1.

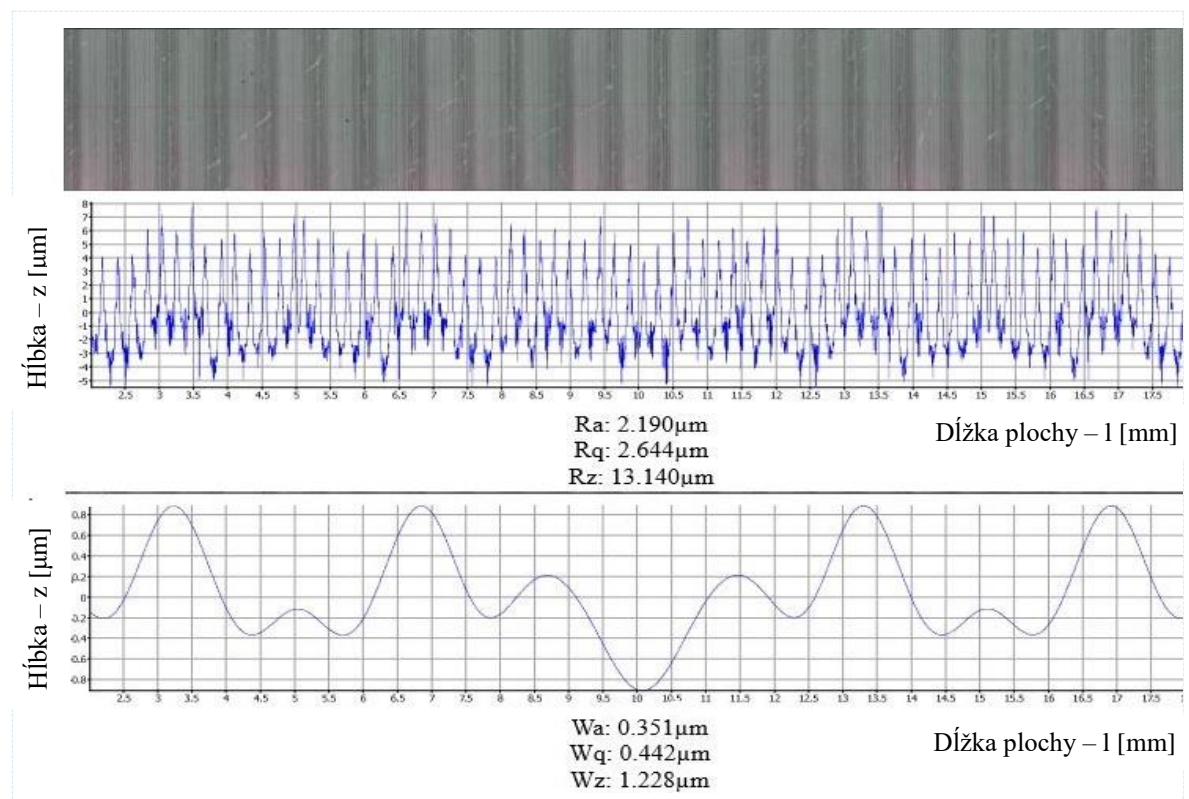


Obr. 17 3D Povrch vzorky číslo 2.

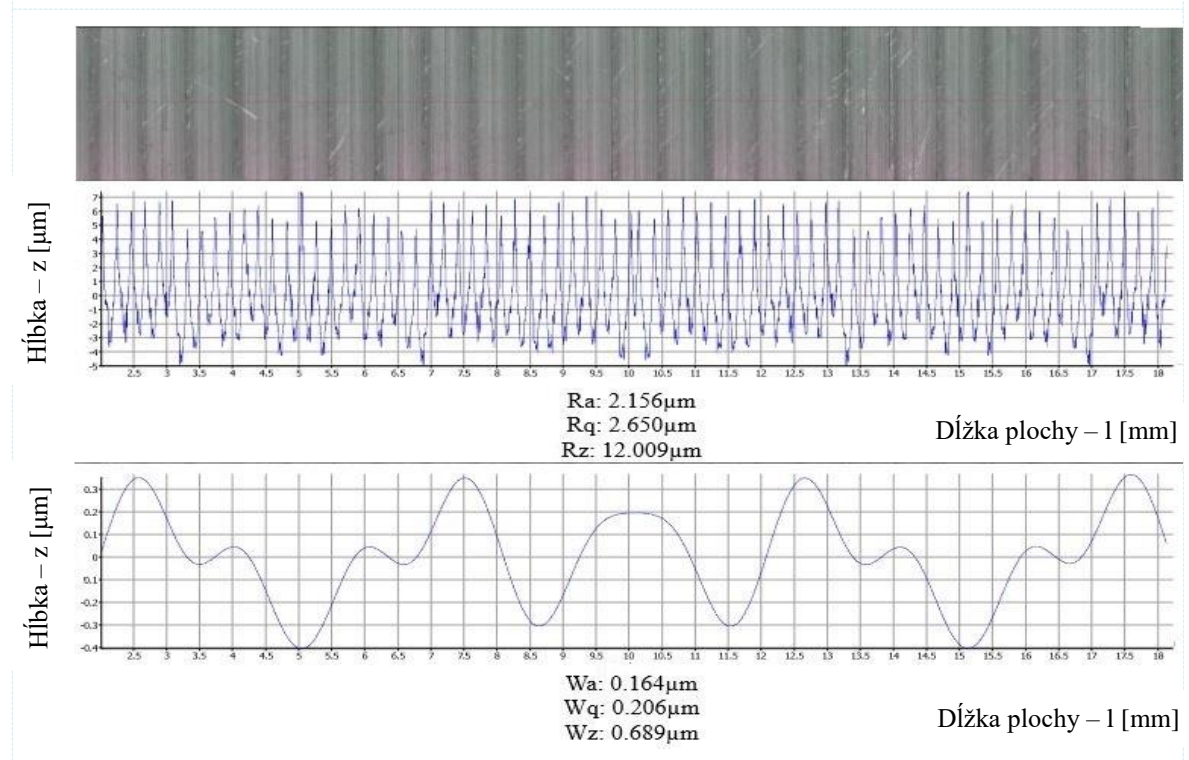


Obr. 18 3D Povrch vzorky číslo 3.

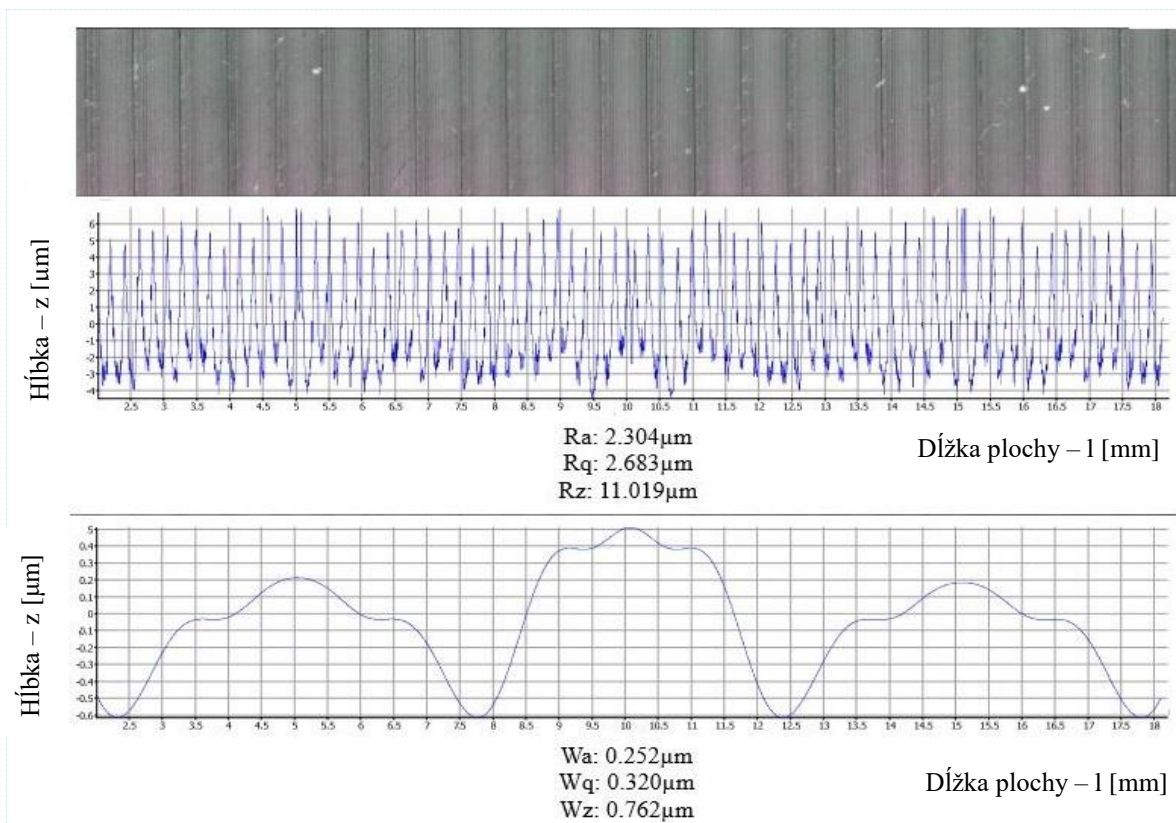
Na obrázkoch 19, 20, 21 sú zobrazené povrchy vzoriek v skutočných farbách, profily drsnosti a profily vlnitosti.



Obr. 19 Vzorka číslo 1.



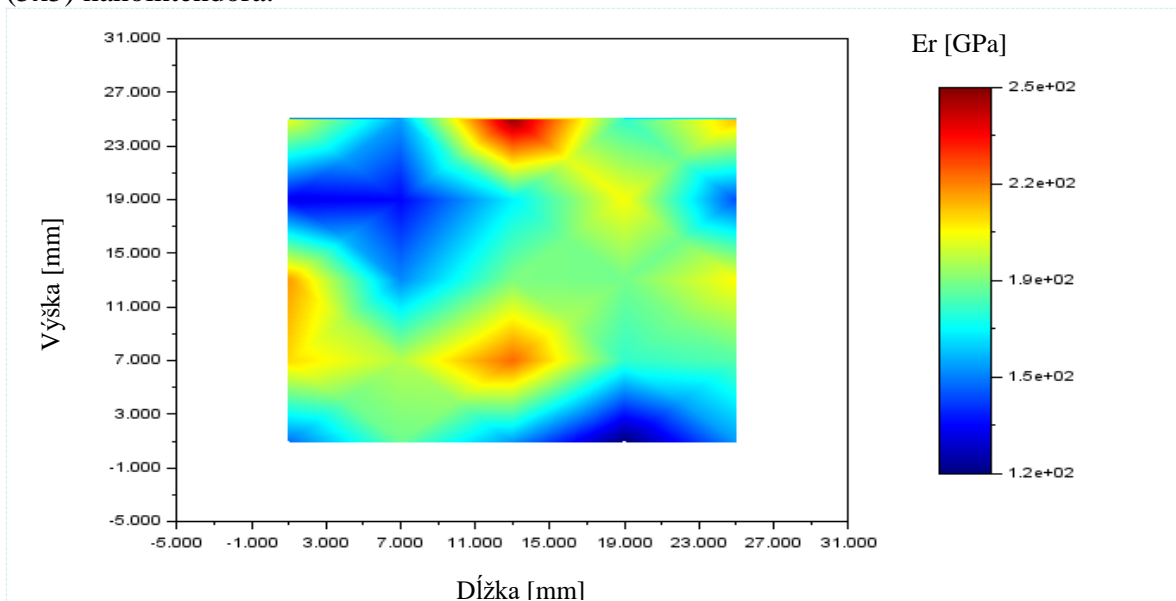
Obr. 20 Vzorka číslo 2.



Obr. 21 Vzorka číslo 3.

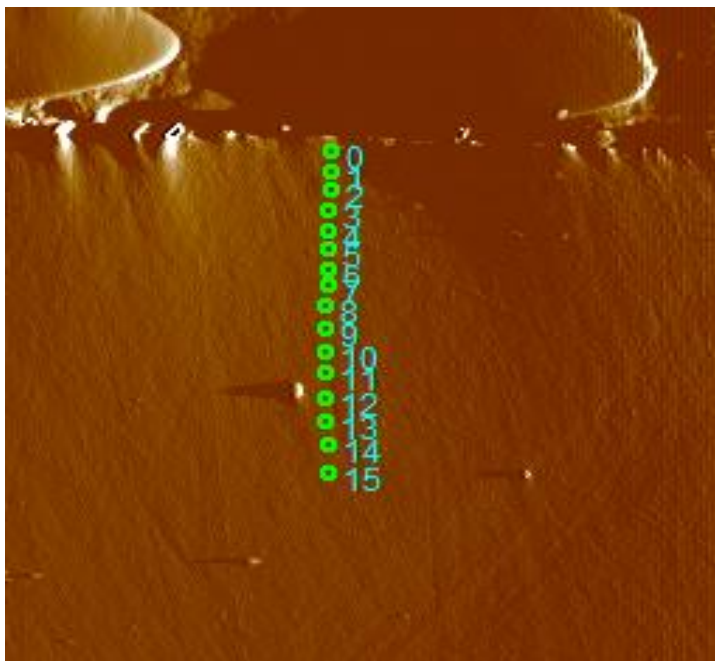
5.2 Výsledky nanomechanických skúšok

Mapa dokumentujúca redukovaný modul pružnosti základného materiálu je zobrazená na obrázku 22. Uvedená mapa vznikla z plochy, na ktorú bolo aplikovaných 25 vpichov (5x5) nanoindentora.

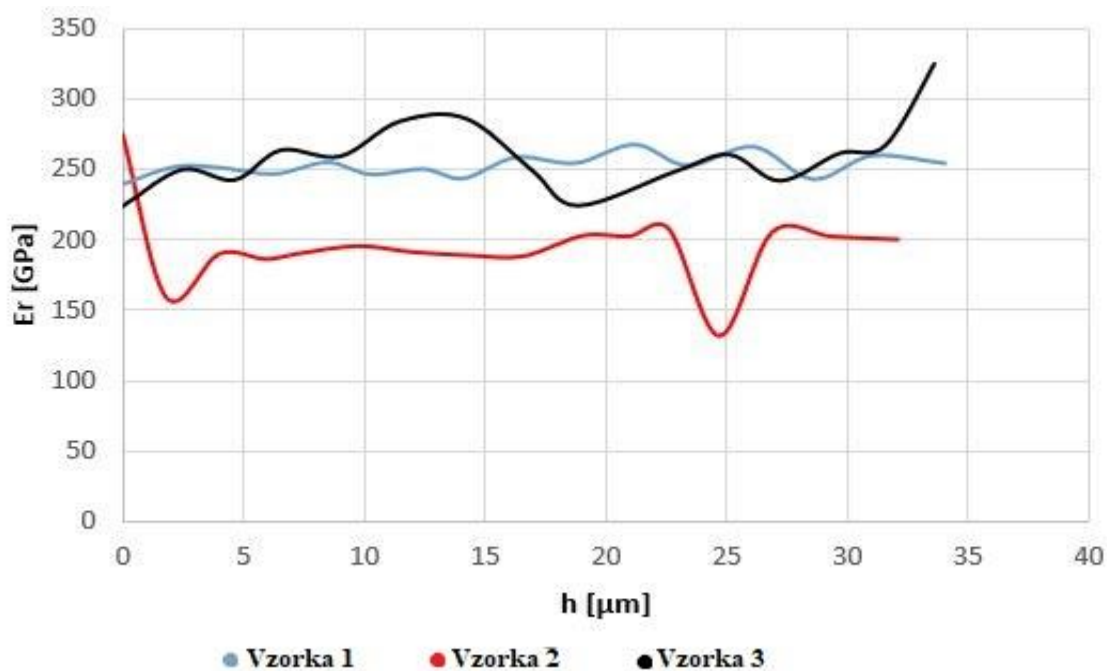


Obr. 22 Redukovaný modul pružnosti základného materiálu.

Jednotlivé vpichy nanoindentora pri meraní redukovaného modulu pružnosti a nanotvrdosti sú zobrazené na obrázku 23. Prvý vpich bol uskutočnený v mieste s označením 0, tento bod sa nachádzal najbližšie k obrobenému povrchu. Pri nasledujúcich vpichoch sa vzdialenosť od povrchu zvyšovala. Rovnaký postup bol použitý pri všetkých vzorkách. Na obrázku 24 je uvedený graf priebehov redukovaného modulu pružnosti pre jednotlivé vzorky s rastúcou hĺbkou (h). Výraznejšie skoky v hodnotách E_r sú s najväčšou pravdepodobnosťou spôsobené možnými nečistotami v štruktúre ocele.

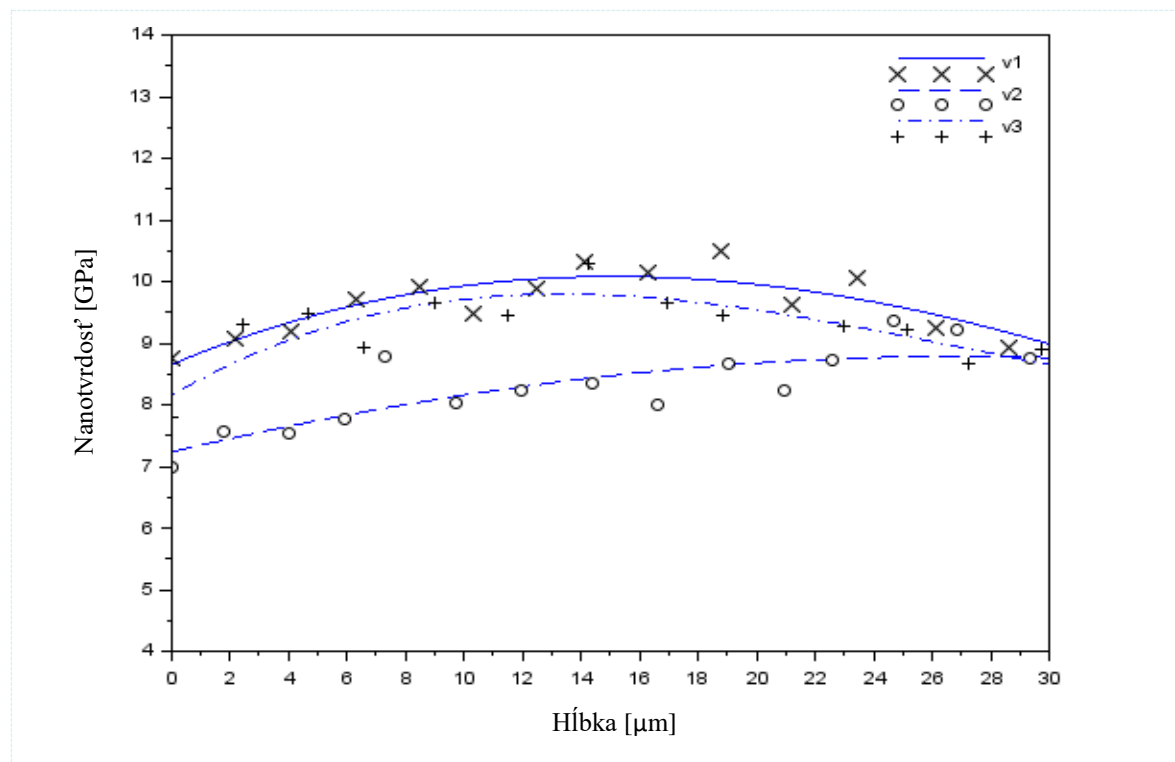


Obr. 23 Vpichy nanoindentora.



Obr. 24 Priebehy redukovaných modulov pružnosti.

Výsledný priebeh nanotvrdostí skúmaných vzoriek je uvedený na obrázku 25.



Obr. 25 Nanotvrdosti vzoriek.

5.3 Tvar triesky

Výsledné osústružené vzorky a k nim prislúchajúce triesky sú zdokumentované na obrázkoch 26, 27 a 28.



Obr. 26 Vľavo vzorka číslo 1, vpravo trieska.



Obr. 27 Vľavo vzorka číslo 2, vpravo trieska.



Obr. 28 Vľavo vzorka číslo 3, vpravo trieska.

ZÁVER

Bakalárska práca bola zameraná na teoretický rozbor obrobiteľnosti austenitických ocelí a na prípravu a realizáciu experimentu, v ktorom sa sledoval vplyv zmeny reznej rýchlosti na obrobenú povrchovú a podpovrchovú vrstvu. Z teoretického štúdia a následných praktických experimentov vyplynulo nasledovné:

- zmeny reznej rýchlosti v_c v zásade významne neovplyvnili hodnoty priemernej aritmetickej úchyľky profilu drsnosti (R_a) a pri všetkých skúmaných vzorkách sa líšia len minimálne,
- výraznejšie zmeny sa prejavili pri parametroch celkovej výšky profilu drsnosti a najväčšej výšky profilu drsnosti (R_t, R_z), kde bola pozorovaná nepriama úmernosť medzi zvyšujúcou sa reznou rýchlosťou a meranými parametrami,
- pri profile vlnitosti boli najnižšie hodnoty dosiahnuté pri rýchlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, pričom pri vyššej reznej rýchlosti bol pozorovaný menší nárast hodnôt parametrov ako pri nižšej reznej rýchlosti,
- redukovaný modul pružnosti sa pri rýchlostiach $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a $300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ zásadne nelíši, zmenu možno vidieť pri rýchlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, kde je hodnota redukovaného modulu pružnosti v priemere o 50 GPa nižšia,
- spevnenie, ku ktorému došlo v priebehu sústruženia bolo najnižšie pri použití reznej rýchlosti $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (odporúčanie výrobcu VBD), pri reznej rýchlosti $100 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ bola hodnota vyššia a k najvýraznejšiemu spevneniu došlo pri rýchlosti $300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, vid' obrázok 25,
- charakter tvaru odobranej triesky bol pri najnižšej reznej rýchlosti krátky-lámavý, s nárastom reznej rýchlosti sa tvar triesky zmenil na vinutú a postupne sa predlžoval,
- s rastúcou reznou rýchlosťou došlo k predpokladanému nárastu výkonu.

ZOZNAM POUŽITEJ LITERATÚRY

1. NĚMEC, Karel. Korozivzdorné a žáruvzdorné oceli. *UMVI Ústav materiálových věd a inženýrství* [online]. Brno, c2012 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: http://ime.fme.vutbr.cz/images/umvi/vyuka/struktura_a_vlastnosti_materialu/prednasky/06%20-%20Korozivzdorne%20a%20zaruvzdorne%20oceli.pdf
2. ČÍHAL, Vladimír. *Korozivzdorné oceli a slitiny*. Praha: Academia, 1999. Česká matice technická (Academia). ISBN 80-200-0671-0.
3. ZÁDĚRA, Antonín. Metalurgie oceli (CME) druhá část před. *Slideplayer* [online]. [cit. 2019-02-09]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2442538/>
4. PARK, Dae-bum, Moo-young HUH, Woo-sang JUNG, Jin-yoo SUH, Jae-hyeok SHIM a Seung-cheol LEE. Effect of vanadium addition on the creep resistance of 18Cr9Ni3CuNbN austenitic stainless heat resistant steel. *Journal of Alloys and Compounds* [online]. Elsevier B.V, 2013, **574**(C), 532-538 [cit. 2019-02-20]. DOI: 10.1016/j.jallcom.2013.05.106. ISSN 0925-8388. Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925838813012668>
5. BREGLIOZZI, G., S.I.-U. AHMED, A. DI SCHINO, J.M. KENNY a H. HAEFKE. Friction and Wear Behavior of Austenitic Stainless Steel: Influence of Atmospheric Humidity, Load Range, and Grain Size. *Tribology Letters* [online]. 2004, **17**(4), 697-704 [cit. 2019-02-20]. DOI: 10.1007/s11249-004-8075-z. ISSN 1023-8883. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11249-004-8075-z>
6. *Příručka obrábění: kniha pro praktiky*. Praha: Scientia, 1997. ISBN 91-972-2994-6
7. *FASTENERS spojovací materiál* [online]. Praha, c2019 [cit. 2019-02-27]. Dostupné z: <https://www.fasteners-cz.cz/druhy-nerozove-oceli-priklady-jejeho-uziti>
8. SEKINE, M., N. SAKAGUCHI, M. ENDO, et al. Grain boundary engineering of austenitic steel PNC316 for use in nuclear reactors. *Journal of Nuclear Materials* [online]. 2011, 414(2), 232-236 [cit. 2019-02-27]. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.03.049. ISSN 00223115. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0022311511003321>
9. SECO TOOLS CZ. *Obrábění nerezových ocelí: příručka pro technology*. Česko]: Seco Tools CZ, s. r. o, 2012, 19 stran : barevné ilustrace, fotografie.
10. NESLUŠAN, Miroslav. *Experimentálne metódy v trieskovom obrábani*. Žilina: Žilinská univerzita v Žiline, 2007. ISBN 978-808-0707-118.
11. MILLS, B. a A. H. REDFORD. *Machinability of engineering materials*. New York, NY, USA: Sole distributor in the USA and Canada, Elsevier Science Pub. Co., c1983. ISBN 08-533-4183-4.
12. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
13. TU, Zhen xiang. Experience and Study of Austenitic Stainless Steel Machining. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2012, 511, 88-91 [cit. 2019-03-13]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.511.88. ISSN 1022-6680. Dostupné také z: <https://www.scientific.net/AMR.511.88>

14. TIAN, Yong a Zhuang LI. The Influence of Alloying Additives on the Machinability of Austenitic Stainless Steel. *Advanced Materials Research* [online]. Trans Tech Publications, 2011, 189, 23-30 [cit. 2019-03-06]. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.189-193.23. ISSN 1022-6680. Dostupné z: <https://www-scientific-net.ezproxy.lib.vutbr.cz/AMR.189-193.23>
15. SEDLÁK, Josef. *Nástrojové materiály, nástrojové oceli, slinuté karbidy, řezná keramika, diamant atd.* [online]. Brno, c2004-2019 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/389302/mod_resource/content/1/N%C3%A1strojov%C3%A9%20materi%C3%A1ly_03_doc.%20Sedl%C3%A1k%20-%20studenti.pdf
16. Strojírenská technologie Plzeň 2011: sborník abstraktů: IV. ročník mezinárodní konference konané ve dnech 25.- 26.1.2011 v Plzni. Vyd. 1. Plzeň: ZČU v Plzni, 2011. ISBN 978-80-7043-934-0, [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/16358/1/Belan.pdf>
17. Nástrojové materiály. SANDVIK Coromant [online]. Sandviken, c2000-2012 [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/materials/pages/cutting-tool-materials.aspx>
18. YIN, Zengbin, Chuanzhen HUANG, Juntang YUAN, Bin ZOU, Hanlian LIU a Hongtao ZHU. Cutting performance and life prediction of an Al₂O₃/TiC micro-nano-composite ceramic tool when machining austenitic stainless steel. *Ceramics International* [online]. Elsevier, 2015, 41(5), 7059-7065 [cit. 2019-03-27]. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.02.012. ISSN 0272-8842 Dostupné také z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S027288421500231X>
19. DE VOS, Patrick a Jan-Eric STÄHL. SECO TOOLS AB. *Obrábění kovů: teorie v praxi*. Lund: Fagersta: Division of Production and Materials Engineering, Lund University ; Seco Tools AB, 2014, 184 stran : barevné ilustrace, fotografie.
20. Nanášení povlaků technologií PVD, PACVD a CVD. VUHZ [online]. Dobrá, c2017 [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.vuhz.cz/povlaky-pvd-pacvd-a-cvd/technologie>
21. Základy obrábění. *Základy obrábění* [online]. [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabení.htm>
22. BUMBÁLEK, Bohumil, Bohuslav OŠŤÁDAL a Emil ŠAFR. *Řezné kapaliny*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
23. NEREZOVÁ OCEL A ROVNOVÁHA KLÍČOVÝCH FAKTORŮ PŘI JEJÍM OBRÁBĚNÍ. SECO [online]. Fagersta [cit. 2019-03-27]. Dostupné z: <https://www.secotools.com/#article/21497?language=cs>
24. CETIN, M. huseyin, Babur OZCELIK, Emel KURAM a Erhan DEMIRBAS. Evaluation of vegetable based cutting fluids with extreme pressure and cutting parameters in turning of AISI 304L by Taguchi method. *Journal of Cleaner Production* [online]. Elsevier, 2011, 19(17), 2049-2056 [cit. 2019-03-29]. DOI: 10.1016/j.jclepro.2011.07.013. ISSN 0959-6526. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095965261100254X>

25. KŘÍŽ, Antonín. Integrita povrchu obrobku. *Oddělení povrchového inženýrství* [online]. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2014 [cit. 2019-04-29]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/download/profesor_1.pdf
26. BERÉNYI, Igor a Jozef MAJERÍK. *Princíp fungovania nanomechanického prístroja* [rozhovor] 26.4.2019.
27. ALICONA IMAGING. *InfiniteFocus G5 Version c* [pdf súbör]. 13.4.2016 [cit. 2019-5-6].
28. NEREZOVÁ OCEL 1.4541. *INOX, spol. s r. o. - NEREZOVÝ HUTNÍ MATERIÁL* [online]. Dřevčice, 2019 [cit. 2019-05-03]. Dostupné z: <http://www.inoxspol.cz/nerezova-ocel-14541.html>
29. METELKOVÁ, Jitka. Pokročilé metody vyhodnocování topografie povrchu. Brno 2014. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 77 s. 4 příloh. Vedoucí bakalářské práce prof. Ing. Miroslav Piška, CSc.
30. GAZÁREK, Vladimír: 3D hodnotenie drsnosti povrchu. [Bakalárska práca] – Slovenská technická univerzita v Bratislave. Materiálovotechnologická fakulta so sídlom v Trnave, Ústav výrobných technológií; – Školiteľ: Ing. Ľubica Eleková, - Trnava: MtF STU, 2010. 55 s.
31. KŘÍŽ, Antonín. NOVÉ TRENDY VÝVOJE TENKÝCH VRSTEV VYTVOŘENÝCH PVD A CVD TECHNOLOGIÍ V APLIKACI NA ŘEZNÉ NÁSTROJE. *FAKULTA STROJNÍ ZÁPADOČESKÉ UNIVERZITY V PLZNI* [online]. Plzeň [cit. 2019-04-04]. Dostupné z: https://www.opi.zcu.cz/Nove_trendy.pdf

ZOZNAM POUŽITÝCH SYMBOLOV A SKRATIEK

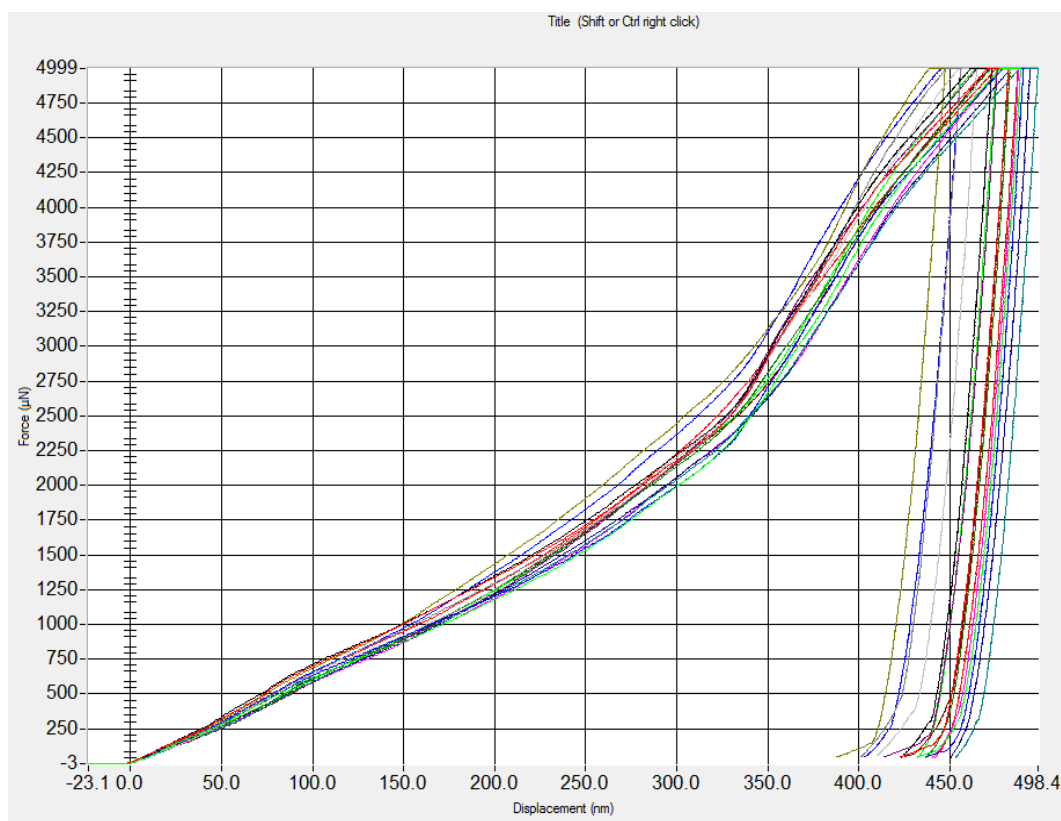
Skratka	Popis
CVD	Chemical Vapour Deposition
HB	tvrdosť podľa Brinella
HBS	tvrdosť podľa Brinella s kalenou guličkou
HC	povlakovaný spekaný karbid
HRB	tvrdosť podľa Rockwella s kalenou guličkou
HRC	tvrdosť podľa Rockwella s diamantovým kuželom
HV	tvrdosť podľa Vickersa
MTCVD	Medium Temperature Chemical Vapour Deposition
PACVD	Plasma Asisted Chemical Vapor Deposition
PD	polykryštalický diamant
PKNB	polykryštalický kubický nitrid bóru
PVD	Physical Vapour Deposition
SPM	Scanning Probe Microscopy
VBCF	Vegetable Based Cutting Fluids

Symbol	Jednotka	Popis
A	[%]	predĺženie
a_p	[mm]	šírka záberu hlavného ostria
E_r	[GPa]	redukovaný modul pružnosti
f	[Hz]	frekvencia
f	[mm]	posuv na otáčku
P	[W]	výkon
n	[min ⁻¹]	otáčky
R_m	[MPa]	pevnosť v ťahu
R_{p0,2}	[MPa]	zmluvná medza klzu
v_c	[m.min ⁻¹]	rezná rýchlosť
λ	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]	koeficient tepelnej vodivosti

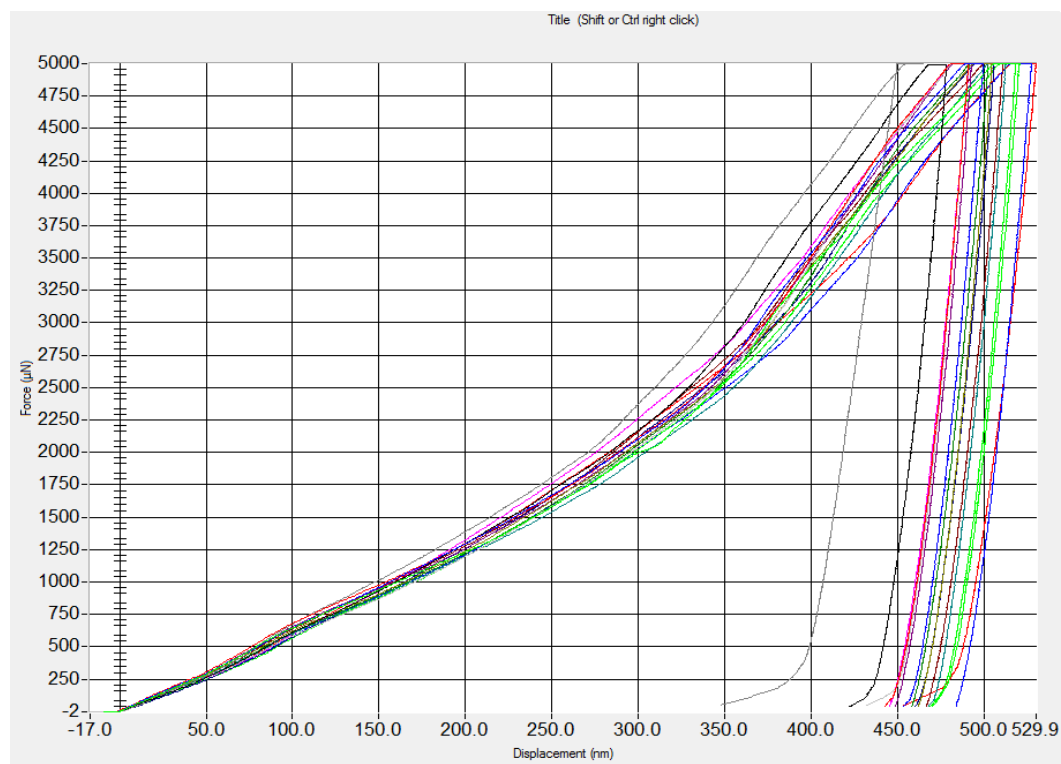
ZOZNAM PRÍLOH

- Príloha 1 Priebehy zaťažovania jednotlivých vzoriek.
Príloha 2 Umiestnenie vpichov nanointendora pri jednotlivých vzorkách.
Príloha 3 Prostredie softvéru TriboScan prístroja Hysitron so skúmanou vzorkou 1.

PRÍLOHA 1

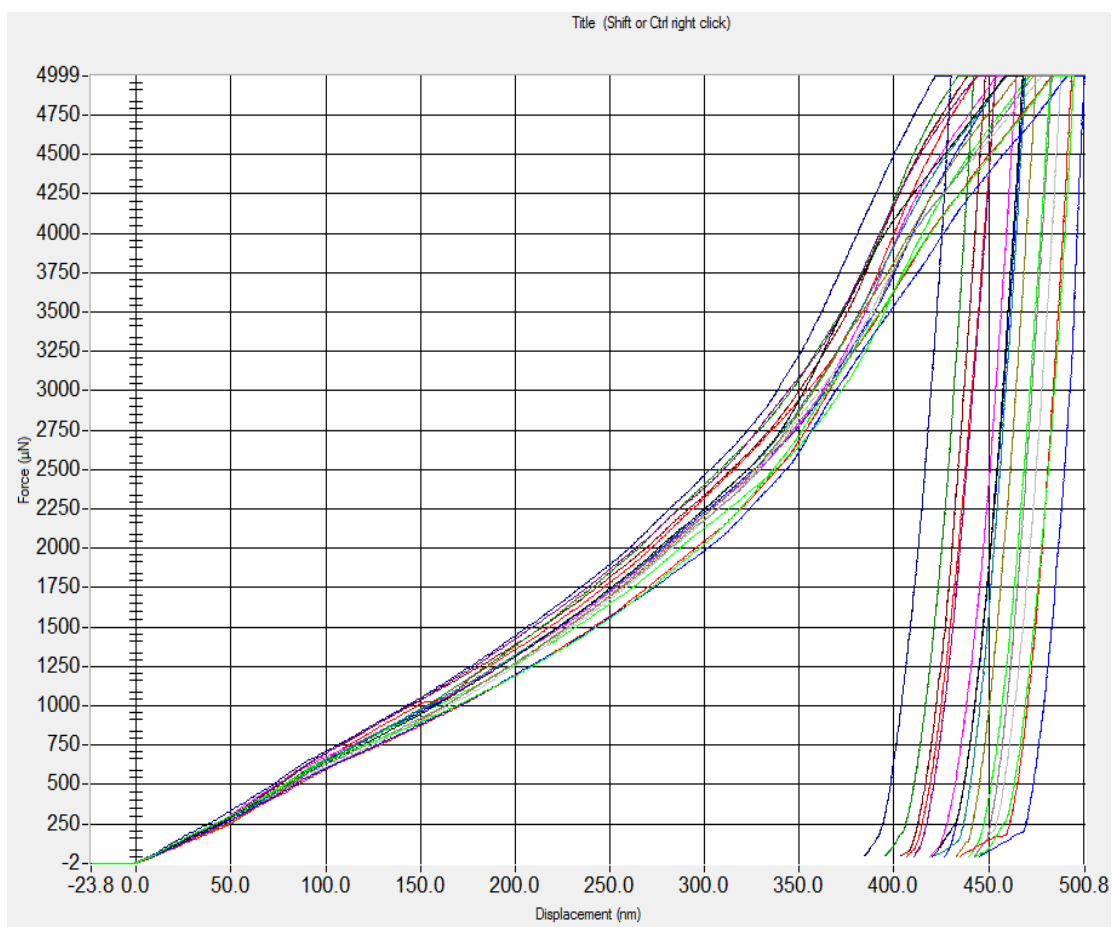


Závislosť sily a hĺbky vpichu pre vzorku číslo 1.



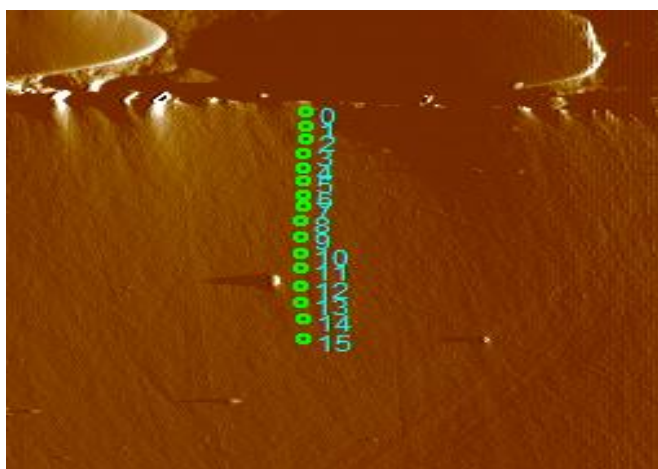
Závislosť sily a hĺbky vpichu pre vzorku číslo 2.

PRÍLOHA 1

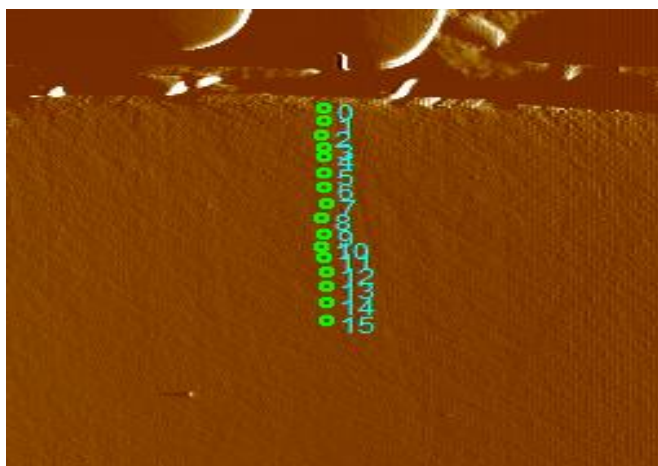


Závislosť sily a hĺbky vpichu pre vzorku číslo 3.

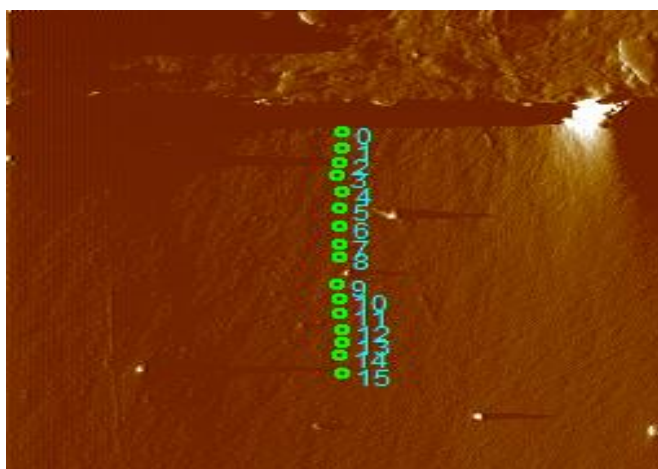
PRÍLOHA 2



Naznačenie vpichov nanointendora pri vzorke číslo 1.

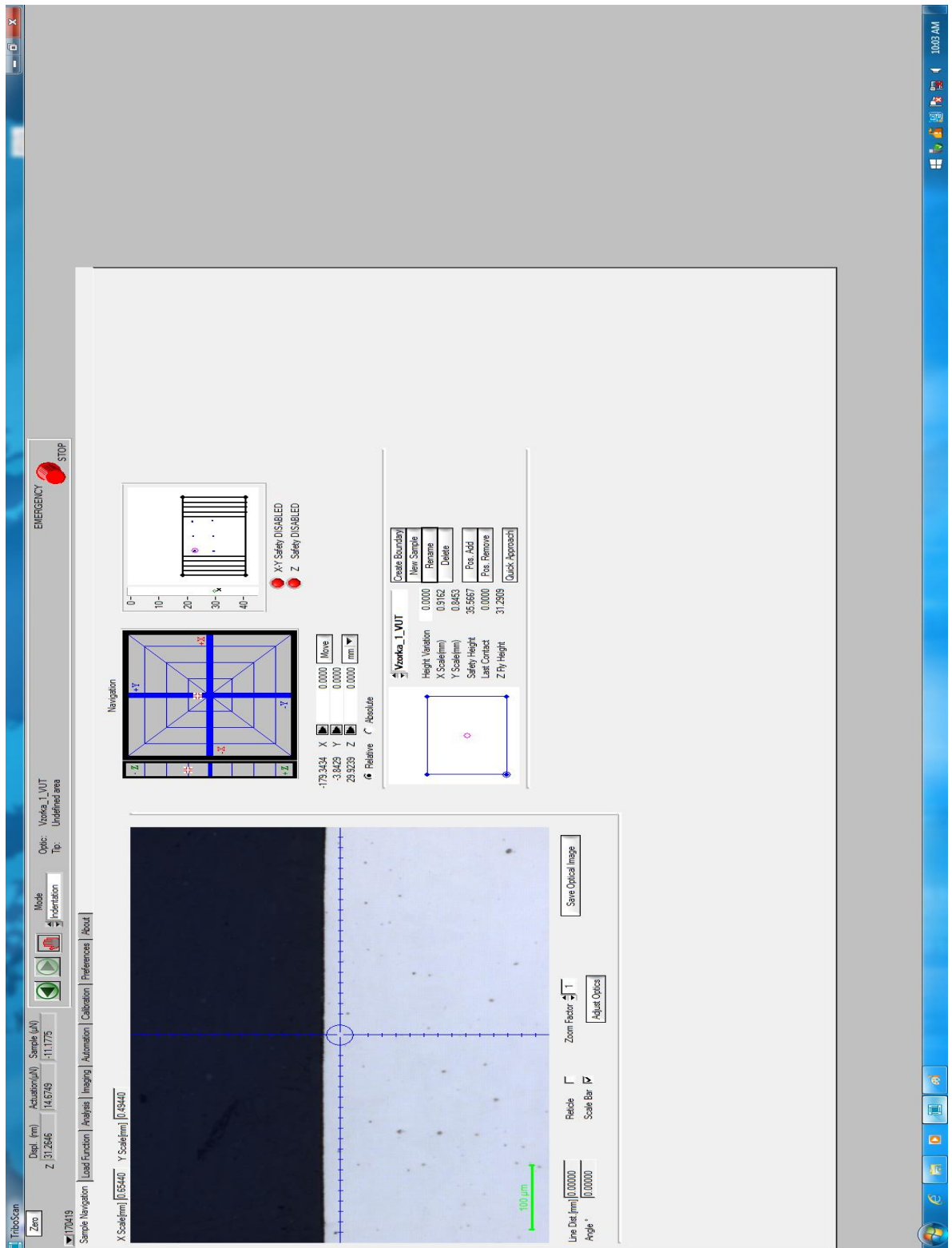


Naznačenie vpichov nanointendora pri vzorke číslo 2.



Naznačenie vpichov nanointendora pri vzorke číslo 3.

PRÍLOHA 3



Prostredie programu TriboScan s umiestnenou vzorkou číslo 1.