

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNOLOGIE OBRÁBĚNÍ, PROJEKTOVÁNÍ A METROLOGIE



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Integrita obrobeného povrchu se zaměřením na analýzu průběhu jeho zpevnění
u rotačních dílců**

**Machined surface integrity with a focus on analysis of its microhardness for
rotational parts**

AUTOR: Matouš Uhlík

STUDIJNÍ PROGRAM: Teoretický základ strojního inženýrství

VEDOUCÍ PRÁCE: Ing. Pavel Zeman, Ph.D.

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Uhlík**

Jméno: **Matouš**

Osobní číslo: **474998**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávací katedra/ústav: **Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Integrita obrobeného povrchu se zaměřením na analýzu průběhu jeho zpevnění u rotačních dílců

Název bakalářské práce anglicky:

Machined surface integrity with a focus on analysis of its microhardness distribution for rotational parts

Pokyny pro vypracování:

1. Teorie vzniku tvorby třísky a obrobeného povrchu
2. Definice a popis integrity povrchu a dílčích pojmů
3. Zpevnění a mikrotvrdost obrobeného povrchu
4. Návrh metodiky stanovení průběhu mikrotvrdosti v materiálu pro rotační dílec

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Zeman, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Ing. Pavel Kožmín, Ph.D., HOFMEISTER s. r. o.

Datum zadání bakalářské práce: **30.04.2020**

Termín odevzdání bakalářské práce: **31.07.2020**

Platnost zadání bakalářské práce: _____



Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Libor Beránek, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry



prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

29. 6. 2020

Datum převzetí zadání



Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně a to výhradně s použitím pramenů a literatury, uvedených v seznamu citovaných zdrojů.

V Praze dne:

.....

Podpis

Abstrakt

Tématem předložené bakalářské práce jsou změny mechanických vlastností v povrchových vrstvách ovlivněných technologií obrábění. Významnou změnou, kterou obrábění v povrchu vyvolává, je zpevnění. Tento jev významně ovlivňuje užité vlastnosti obrobku a je potřeba mu v technologickém procesu věnovat pozornost. Nejvhodnějším indikátorem míry zpevnění je hodnota tvrdosti, která se měří pomocí širokého spektra standardizovaných měřících metod. Bakalářská práce obsahuje návrh metodiky zjištění průběhu zpevnění na rotačních dílcích, které patří k nejčastějším typům obrobků. Součástí je i experimentální ověření navržené metodiky. V teoretické části jsou shrnuty podstatné jevy mající vliv na vlastnosti povrchu a také metody jejich měření.

Klíčová slova

Obrobený povrch, integrita povrchu, topografie povrchu, zbytková napětí, strukturní změny, tvrdost, mikrotvrdost, zpevnění, průběh zpevnění, rotační dílce

Abstract

The main theme of submitted bachelor thesis is mechanical properties change in surface layers affected by technology of machining. Hardening is one of most substantial surface layer change caused by machining. This phenomenon has huge impact on workpiece properties, and it is essential to devote to this phenomenon adequate attention. Most representative indicator of such change is the hardness which can be measured by various standardized tests. Bachelor thesis contains proposal of methodology for hardening progress analysis for rotational parts which are most frequent type of workpieces within industrial production. Experimental verification follows this methodology design. In theoretical part of bachelor thesis there is a description of substantial phenomena related to machined surface properties and relevant methods of its measuring.

Keywords

Machined surface, surface integrity, surface topography, residual stresses, structural changes, hardness, microhardness, hardening, hardening distribution, rotational parts

Poděkování

Je milou povinností poděkovat vedoucímu práce Ing. Pavlu Zemanovi, Ph.D za ochotu předávat cenné rady a zkušenosti a také za vedení ke konstruktivnímu přístupu při řešení technických problémů. Dále děkuji Ing. Vladimíru Márovi za nezištnou pomoc při přípravě povrchu vzorků pro experimentální část práce. Poděkování patří také zaměstnancům Fakulty strojní za pomoc při vlastní realizaci experimentální části.

Tato práce vznikla s podporou projektu OPVVV: „Nové nanostruktury pro inženýrské aplikace umožněné kombinací moderních technologií a pokročilých simulací“, CZ.02.1.01/0.0/0.0/16_026/0008396.

Obsah

1. Úvod a cíle práce	1
2. Obrábění	2
2.1. Řezný nástroj	3
2.2. Vznik třísky	4
2.2.1. Morfologie třísky	4
2.2.2. Oblasti plastické deformace	5
3. Integrita povrchu	11
3.1. Topografie povrchu	11
3.2. Zbytková napětí	14
3.3. Strukturní změny a opaly	16
3.4. Tvrdost	18
4. Mikrotvrdost	22
4.1. Hloubka a stupeň zpevnění	23
4.2. Aplikované způsoby přípravy vzorků	24
5. Shrnutí teoretické části	27
6. Návrh a ověření metodiky měření průběhu zpevnění na rotačních dílcích..	28
6.1. Návrh principu vyhodnocení a podoby vzorku	28
6.2. Teoretický rozbor vztahu mezi polohou na řezu a hloubkou pod povrchem	30
6.3. Příprava vzorků	32
6.4. Sestava pro měření průběhu zpevnění	38
6.5. Měření průběhu zpevnění	40
6.5.1. Upnutí a vyrovnaní	40
6.5.2. Strategie měření	41
6.5.3. Naměřené hodnoty	43
6.5.4. Vyhodnocení a analýza výsledků	44
7. Shrnutí experimentální části	56
8. Závěr	59
Seznam použité literatury	60
Seznam obrázků	64
Seznam tabulek	66
Příloha 1 – Specifikace soustružnického nože a vyměnitelné břitové destičky..	67
Příloha 2 – Výkresy polotovarů pro výrobu vzorků	68

Příloha 3 – Pracovní postup pro práci s mikrotvrdoměrem Struers Duramin.....	71
Příloha 4 – Tabulky naměřených hodnot	81

1. Úvod a cíle práce

Obrábění je stále nejrozšířenějším způsobem dosahování požadovaného tvaru obrobků v průmyslové výrobě. I přes dobu, po kterou jsou základní principy technologie známy, je obrábění stále předmětem vývoje a inovací. V současné době se v oblasti vývoje obrábění řeší požadavky kladené současnou podobou průmyslu, kterými jsou například:

- multifunkčnost obráběcích center a automatizace obráběcího procesu
- zvýšení přesnosti obrábění
- ekologičnost
- zvyšování produktivity

Jakýkoli inovační krok směrem k výše zmíněným cílům bude vždy hodnocen také z hlediska výsledné kvality obrobené plochy. Vlastnosti povrchové vrstvy hrají totiž klíčovou roli například v otázkách únavové životnosti, opotřebení či tření. V důsledku toho je integrita povrchu předmětem zájmu i v běžném provozu, a to v oblasti konstrukce, v oblasti výroby i v oblasti metrologie. Považuji důležité zmínit, že vztah mezi výrobním procesem a jednotlivými faktory integrity povrchu není dokonale popsán. Zároveň v současné době neexistuje časově i finančně nenáročná metoda, kterou by bylo možné získat komplexní charakteristiku obrobené plochy. Integrita povrchu je otázka aktuální, přínos v této oblasti by byl významný nad rámec technologie obrábění.

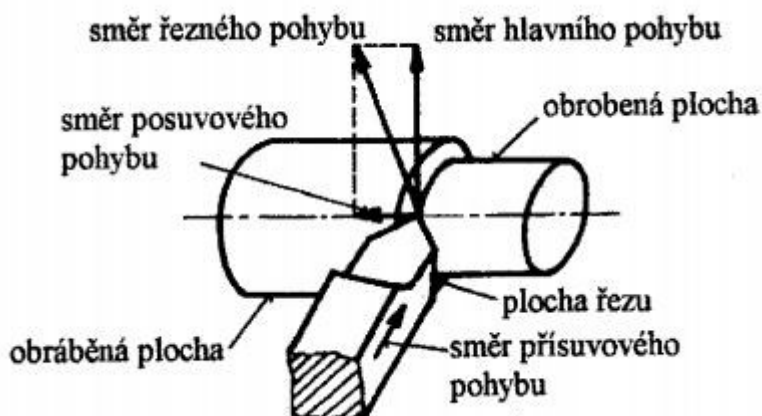
Cílem teoretické části bakalářské práce je popsat vznik obrobeného povrchu, nastínit hodnocené vlastnosti povrchové vrstvy a také vyjmenovat, jaké jsou základní metody pro jejich měření. Dále je v teoretické rovině záměrem navrhnout metodiku zjištění průběhu mikrotvrdosti pod povrchem na rotačních dílcích.

V experimentální části je za cíl vytyčeno vypracování pracovního postupu pro práci s mikrotvrdoměrem, na kterém může být následně experimentálně verifikována navržená metodika měření.

2.Obrábění

Obrábění lze definovat jako technologický proces, při kterém dochází k úběru materiálu tak, aby vznikl požadovaný tvar. Odebírání materiálu může probíhat mechanickými, elektrickými, elektrochemickými či jinými způsoby. Pro potřeby práce bude blíže analyzován mechanický způsob úběru, kdy odebraný materiál odchází ve tvaru třísky. Proces obrábění probíhá v soustavě stroj – nástroj – obrobek. [1] [2]

Nástroj a obrobek jsou vůči sobě v relativním pohybu. Rozlišuje se hlavní pohyb, posuvový pohyb, řezný pohyb a přísuv. Hlavním pohybem je definován pohyb vykonávaný strojem, u soustružení tomu je rotace obrobku, u obrážení tomu je pohyb nástroje. Posuvový pohyb zajišťuje úběr na požadované délce obrobku. Řezným pohybem se rozumí vektorový součet hlavního a posuvového pohybu. Přísvem se označuje pohyb nutný pro nastavení nástroje do pracovní polohy. [1] [2]

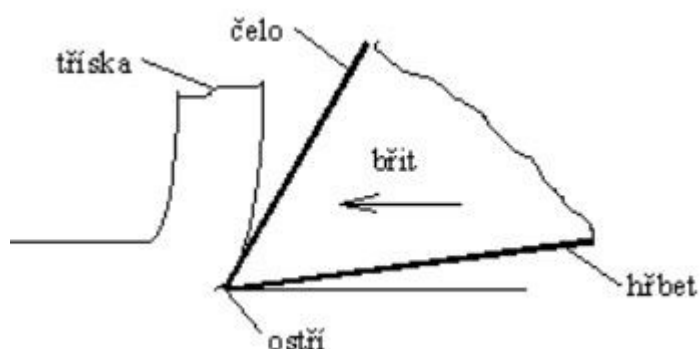


Obrázek 1, Soustružení [1]

U obráběné součásti se dle obr. 1 rozlišují tři plochy. Obráběná plocha je plocha určená k obrobení. Plochou řezu (také přechodovou plochou) se rozumí plocha vznikající obráběním. Obrobená plocha je nově vzniklá plocha, stává se předmětem zájmu při zkoumání integrity povrchu. [1] [2]

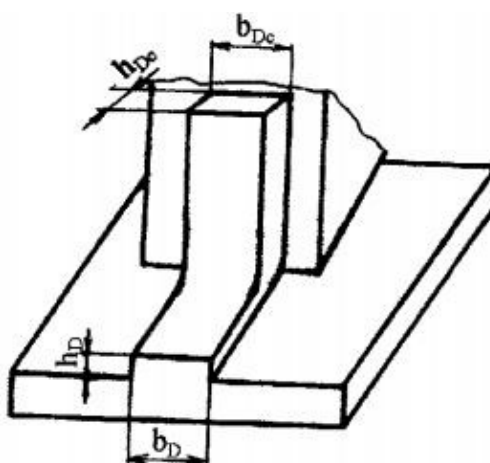
2.1. Řezný nástroj

Funkčním prvkem nástroje je břit – synonymem řezný klín (obr. 2). Utváří obrobený povrch. Skládá se z ostří, čela a hřbetu. Čelo je označení pro plochu nebo souhrn ploch, po které odchází tříska. Ostří je ta část nástroje, která koná vlastní odřezávání materiálu. Hřbet je definován jako plocha nebo souhrn ploch, které jsou orientovány k obrobené ploše. Geometrie řezného klínu povrch přímo ovlivňuje. Poloměr špičky, úhel čela i hřbetu mají vliv na oblasti plastické deformace. Břitů může být na nástroji více, takový nástroj se pak označuje jako vícebřitý, typickým příkladem je vrták či fréza. Mezi jednobřité nástroje patří například soustružnický nebo obrážecí nůž. [1] [2] [3]



Obrázek 2, Řezný klín [3]

Pro popis třísky je vhodné uvést základní geometrické charakteristiky související s jejím vznikem (obr. 3). Tloušťka odřezávané vrstvy je označena jako h_D , šířka odřezávané vrstvy je označena jako b_D , tloušťka třísky je označena jako h_{Dc} a šířka třísky jako b_{Dc} . [1]



Obrázek 3, Geometrické charakteristiky [1]

2.2. Vznik třísky

Třísku lze definovat jako nástrojem odebranou část materiálu. Odebíraná část může projít plastickou deformací, pak se tříska označuje jako tvářená. Pakliže nedochází k plastické deformaci a odebraný materiál je ve formě malých částíček, tříska se označuje jako netvářená. Pro ideální průběh řezného procesu a dosažení požadované kvality obrobené plochy je žádoucí tříska netvářená, jelikož je dobře skladná a nekomplikuje řezný proces například vstupem mezi nástroj a obrobek. Netvářená tříska vzniká při obrábění určitých plastů, dřeva či keramiky. [4]

2.2.1. Morfologie třísky

Tvářená tříska je obvyklá při obrábění většiny kovových materiálů a vzniká v různých tvarových variantách. Morfologii tvářené třísky a systematiku popisu definuje norma ISO 3685. Tvářená tříska se dá rozlišit na soudržnou a elementární. Soudržná se rozděluje dále na plynulou a článkovitou. Základní tvary jsou uvedeny v tabulce 1 včetně systematického značení. Tučně ohraničená část tabulky udává třísky, které jsou z tvarového hlediska pro obrábění ideální. [4]

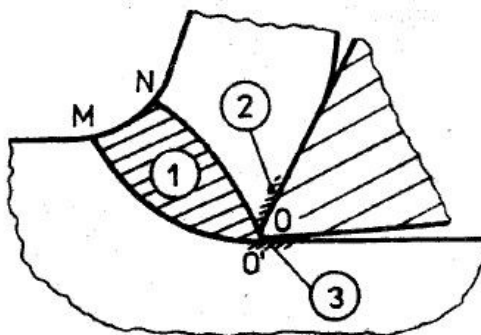
Tabulka 1, Označení tvaru třísek [4]

TVAR TŘÍSKY							
1. Stužkové ^x třísky	2. Vlnité ^x třísky	3. Spirálové ^x třísky	4. Vlnité šroubovitě třísky	5. Kuželovité ^x šroubovitě třísky	6. Obloukovité ^{xx} třísky	7. Elementární třísky	8. Jehlovité třísky
1.1. dlouhé 	2.1. dlouhé 	3.1. ploché 	4.1. dlouhé 	5.1. dlouhé 	6.1. spojené 		
1.2. krátké 	2.2. krátké 	3.2. kuželovité 	4.2. krátké 	5.2. krátké 	6.2. dělené 		
1.3. smotané 	2.3. smotané 		4.3. smotané 	5.3. smotané 			
<p>Směr odchodu třísky je charakterizován třetím číselným údajem připojeným k číslům označujícím tvar třísky.</p> <p>.. 1 - od obrobku ve směru posuvu .. 2 - k obrobku ve směru posuvu .. 3 - k obrobku proti posuvu .. 4 - od obrobku proti posuvu</p>				<p>xx Další dělení je charakterizováno třetím číselným údajem připojeným k údajům tvaru třísky a to:</p> <p>.. 5 - lánaná o hlavní rovinu řezu .. 6 - lánaná o hřbet nástroje .. 7 - lánaná o obráběný povrch .. 8 - lánaná o obrobek .. 9 - lánaná o utvářecí třísky</p>			

2.2.2. Oblasti plastické deformace

Jak bylo zmíněno v části Morfologie třísky, jestliže odebíraný materiál prochází plastickou deformací, pak se označuje jako tvářený. Plastickou deformací se rozumí tvarová změna materiálu, která přetrvává i po odstranění sil, které ji způsobily. Schopnost materiálu měnit svůj tvar při zachování své soudržnosti se označuje jako plasticita. [5]

K plastické deformaci dochází při ortogonálním řezu ve třech oblastech, které jsou označeny jako primární, sekundární a terciární. Jejich lokalizace je patrná na obr. 4: [4]



Obrázek 4, Lokalizace oblastí deformace [4]

1 – primární oblast, 2 – sekundární oblast, 3 – terciární oblast

Primární plastická deformace

Oblast primární plastické deformace je vytyčena body O'MN. Velikost plochy, ve které dochází k primární plastické deformaci, je závislá na plasticitě obráběného materiálu, na řezných podmínkách a na geometrii břitu. Čím větší je schopnost obráběného materiálu procházet plastickou deformací, tím je tato oblast větší. Z řezných podmínek má významný vliv na oblast primární plastické deformace řezná rychlost a tloušťka odřezávané vrstvy. Vyšší hodnota řezné rychlosti způsobuje zmenšení oblasti primární plastické deformace, obdobný vliv má i zvyšování tloušťky odřezávané vrstvy. Z hlediska geometrie řezného klínu je nejzásadnější úhel řezu a poloměr ostří. Zvětšení úhlu řezu či poloměru ostří obecně rozšiřuje tuto oblast. Vlivem poloměru ostří a řezných podmínek, může tato oblast zasahovat i do obrobené plochy a podílet se tak na vzniku zbytkových napětí v povrchové vrstvě.

Právě v oblasti primární plastické deformace dochází k přeměně odřezávané vrstvy na třísku. Při porovnávání geometrie odřezávané vrstvy a třísky lze konstatovat, že plocha řezu třískou je vždy větší než průřez odřezávané vrstvy. Zároveň platí, že délka třísky je menší než posuv vykonaný nástrojem. Objem odřezávané vrstvy a objem třísky je stejný – platí zachování objemu. Je tedy zřejmé, že dochází k pěchování třísky. Míra tohoto pěchování je popsána bezrozměrným součinitelem pěchování K . [6]

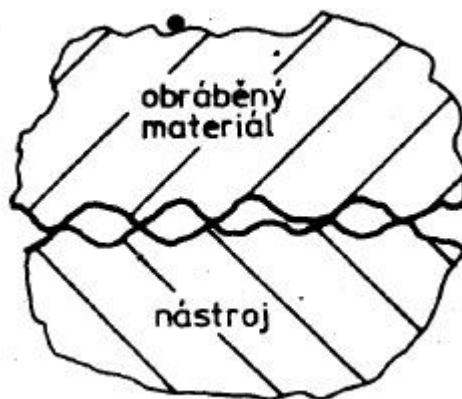
$$K = \frac{h_{Dc}}{h_D} [1] \quad (1)$$

Z praktického hlediska slouží součinitel pěchování pro určení intenzity plastické deformace v řezném procesu. Určení hodnoty součinitele pěchování není v praxi náročné a nabízí přibližnou hodnotu intenzity plastické deformace, která je vhodná ke komparaci. [4]

Sekundární plastická deformace

Oblast sekundární plastické deformace je lokalizována dle obr. 4 na čele nástroje. Materiál vstupující do této oblasti již prošel primární plastickou deformací, důsledkem které je zpevněný. V oblasti sekundární plastické deformace se tvářený materiál pohybuje relativně vůči nástroji. Proti smyslu tohoto pohybu působí třecí síla, kterou lze rozložit na sílu nutnou pro překonávání nerovností obou povrchů a sílu nutnou pro překonávání adheze. Typické pro tuto oblast jsou vysoké teploty (v řádech stovek stupňů Celsia) a vysoké tlaky (v řádech tisíců MPa). [6]

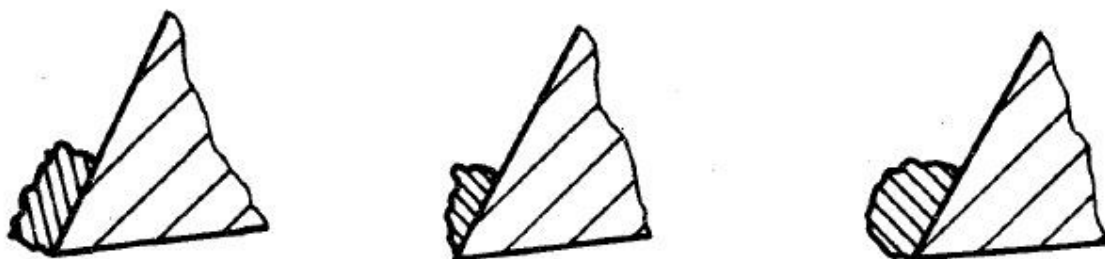
Lze rozlišit dvě formy styku obráběného materiálu a nástroje – bodový styk a plošný styk. Styk bodový je typický zejména pro nižší hodnoty řezné rychlosti a menší silové namáhání. Do kontaktu se dostávají vrcholky nerovností povrchů odebraného materiálu a nástroje, což je schematicky naznačeno na obr. 5.



Obrázek 5, Bodový styk [4]

V místech kontaktu může za určitých podmínek dojít ke vzniku mikrosvarů, které spojují obráběný materiál s nástrojem a způsobují narůst tečných sil. Kvůli tečným silám roste i napětí v tříске, které může přesáhnout hodnotu meze kluzu ve smyku, a může tedy dojít k sekundární plastické deformaci. Je zřejmé, že pro relativní posuv třísky vůči čelu nástroje musí docházet k porušování vznikajících mikrosvarů. Toto porušení je často doprovázeno ulpěním části obrobeného materiálu na nástroji.

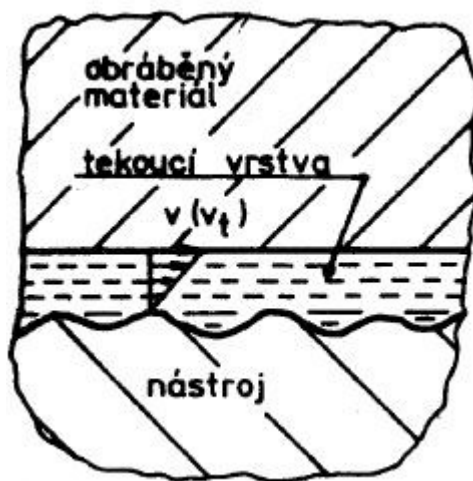
Kumulací těchto částic vzniká nárůstek, který nabývá významných rozměrových parametrů a je pro něj typická značná pevnost a tvrdost. V závislosti na svém tvaru (obr. 6) mění úhel řezu a poloměr ostří, čímž ovlivňuje oblast primární plastické deformace. Řezná síla je tvorbou nárůstku také ovlivněna. [4]



Obrázek 6, Tvarové variace nárůstku [4]

Je časté, že po nabytí určitých rozměrů se nárůstek uvolňuje z nástroje a posléze se tvoří znovu. V literatuře se uvádí frekvence tohoto cyklu až tisíc Hertz. Část uvolněného nárůstku pak odchází s třískou z řezné soustavy a část se dostává do plochy řezu. Tento proces není žádaný z několika důvodů. Jedním z negativních důsledků je opotřebení nástroje, jelikož se při uvolnění nárůstku vytrhne i jeho část. Tento jev má negativní dopad také na jakost obrobené plochy. V ploše řezu a obrobené ploše degraduje přítomnost uvolněného nárůstku drsnost povrchu, což je značně nežádoucí při obrábění na čisto. Pokud se frekvence rozpadu nárůstku blíží vlastní frekvenci kmitů systému stroj – nástroj – obrobek, dojde k rozechvění, které se může projevit nežádoucí vlnitostí obrobené plochy. Méně častým případem je geneze stabilního nárůstku, takový nárůstek supluje funkci bříty a omezuje jeho opotřebení. [4] [6]

K plošnému styku může docházet za vyšších teplot a za významného mechanického namáhání v rovině styku. Hlavním faktorem ovlivňující tyto podmínky je řezná rychlost, s její rostoucí hodnotou inklinuje charakter styku ke styku plošnému. Plošný styk je schematicky zobrazen na obr. 7, kde je vyznačen i rychlostní profil tekoucí vrstvy mezi nástrojem a obrobeným materiálem. Za podmínek plošného styku se nárůstek nevytváří. [4]



Obrázek 7, Plošný styk [4]

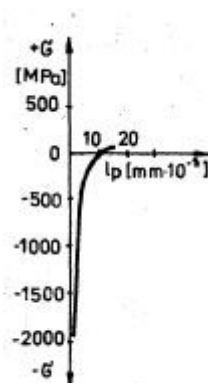
Při obrábění je možný výskyt obou typů styku. Největší normálové i smykové napětí je u špičky nástroje a od určité vzdálenosti od ní klesá. Pokud tedy dochází k plošnému styku, pak je to v oblasti u špičky. Přes přechodovou oblast poté může plošný styk přecházet v bodový. Zdali jde o plošný či bodový styk má význam i z hlediska účinku řezného prostředí. U bodového styku se může řezná kapalina dostat mezi nástroj a obrobek a ovlivnit tak tření mezi plochami. U plošného styku mají řezné kapaliny redukovaný účinek, což se může negativně projevit na jakosti obrobeného povrchu. [4] [6]

Terciární plastická deformace

Oblast terciární plastické deformace lze lokalizovat pod ostří nástroje. Tato oblast má přímý vliv na integritu povrchové vrstvy. Vzniká díky existenci radiusu ostří, který nabývá hodnot v řádech mikrometrů. Důsledkem tohoto zaoblení vzniká silové působení mezi hřbetem nástroje a materiálem obráběného dílce. Toto silové působení vytváří napětí způsobující v povrchové vrstvě materiálu plastickou deformaci vedoucí k vytvoření zbytkového pnutí a zpevnění. Na výsledném zbytkovém pnutí a zpevnění se podílí také vlivy primární plastické deformace, pokud tato oblast zasahuje pod plochu řezu. [4] [6]

Míra hloubky a stupně zpevnění je dána hlavně těmi vlivy, které ovlivňují oblast primární plastické deformace. Jsou jimi vlastnosti obráběného materiálu, řezné podmínky a geometrie břitu. O houževnatějších materiálech lze obecně konstatovat, že lépe zpevňují. Z řezných podmínek je markantním faktorem řezná rychlost a tloušťka odřezávané vrstvy. Nižší řezná rychlost zvětšuje oblast primární plastické deformace, což přispívá ke zpevnění povrchové vrstvy. S větší tloušťkou odřezávané vrstvy se sice šířka oblasti primární plastické deformace zmenšuje, avšak významněji zasahuje pod plochu řezu. Větší hodnota poloměru ostří a úhel řezu rovněž přispívá k většímu zpevnění. Zpevněná vrstva může pozitivně ovlivnit únavovou životnost součásti, pokud je ovšem soudržná s nezpevněným jádrem materiálu a neobsahuje mechanické defekty.

Konkrétní průběh zbytkového napětí závisí na podmínkách namáhání povrchové vrstvy. Je-li povrch vystaven pouze mechanickému zatížení (tedy bez významného teplotního ovlivnění), má rozhodující vliv poměr meze pevnosti a smluvní meze kluzu obráběného materiálu. V literatuře se uvádí, že je-li poměr meze pevnosti a smluvní meze kluzu menší než 1,25; dochází k deformaci zrn ve směru nově vznikajícího povrchu, a tedy k prodloužení povrchové vrstvy. To má za následek vznik tlakových pnutí ve vrstvě, která byla plasticky deformována. Vrstva, která byla v důsledku obrábění vystavena pouze elastické deformaci, vykazuje tahové napětí. Výsledný průběh zbytkového napětí v závislosti na hloubce je naznačen na obr. 8: [7] [4]



Obrázek 8, Příklad průběhu zbytkového napětí od povrchu do materiálu [4]

V případě, že by poměr meze pevnosti a smluvní meze kluzu byl větší než 1,25; zrna by měla tendenci se deformovat ve směru kolmém na nově vznikající povrch a docházelo by ke kontrakci povrchové vrstvy. U povrchu součásti by tak převažovalo tahové napětí. [4]

V praxi dochází při obrábění často k teplotnímu ovlivnění, méně obvykle i k strukturním změnám. Tyto jmenované vlivy přímo ovlivňují výsledné zbytkové napětí. V takových případech je obtížné vyjádřit obecně charakter výsledného pnutí. V úvahu je třeba vzít také fakt, že velké množství součástí je vyráběno sledem technologických operací. Každá technologická operace má vliv na průběh zbytkového napětí. Pro predikci výsledné povrchové napjatosti může posloužit metoda konečných prvků. [4]

3.Integrita povrchu

V kontextu obrábění se integritou povrchu rozumí komplexní charakteristika nově vzniklého povrchu. Jakost obrobeného povrchu je dána následujícími vlastnostmi: [8] [9]

- Topografií povrchu
- Zbytkovým napětím
- Strukturními změnami a opaly
- Tvrdostí

Zmíněné vlastnosti jsou klíčové pro funkčnost a životnost obrobku. Je třeba je vnímat ve vzájemných relacích, nikoliv jako oddělené celky. K ilustraci vzájemné propojenosti jednotlivých faktorů poslouží například zřejmá souvislost mezi tvrdostí a strukturními fází. [8]

V následujících podkapitolách budou detailněji popsány jednotlivé faktory integrity povrchu. Bude uveden jejich význam a metodika měření.

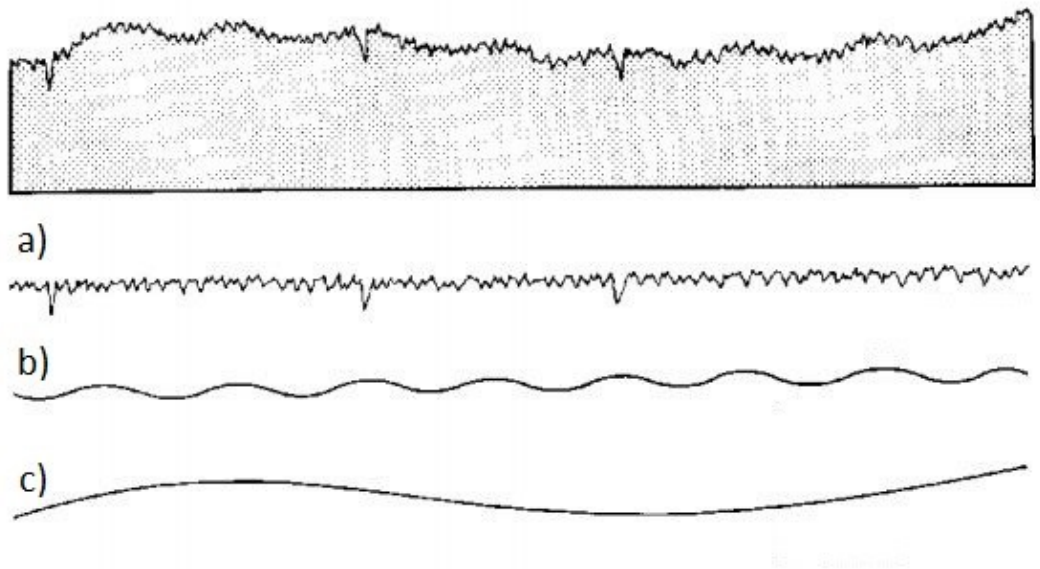
3.1. Topografie povrchu

Vzhledem k časové i finanční náročnosti vyhodnocování všech prvků integrity povrchu, je jakost obrobené plochy často vyvozena jen z topografických měření. Důvodem je pravděpodobně relativně rychle dostupná hodnota a možnost nedestruktivního způsobu měření. Topografie povrchu má vliv na únavovou životnost součásti, ovlivňuje také opotřebení a jeho rozvoj. [10][11][12]

Struktura povrchu je tvořena souborem nerovností. Členěním nerovností dle jejich velikosti jsou získány 3 složky:

- Drsnost (popisuje R – parametr)
- Vlnitost (popisuje W-parametr)
- Základní profil (popisuje P – parametr)

Drsností se rozumí nejmenší nerovnosti vzniklé v průběhu výrobního procesu. Vlnitost je další složkou struktury povrchu, jejíž vznik bývá přisuzován vibracím nebo nedostatečné tuhosti obráběcí soustavy. Základním profil je tvar povrchu při eliminaci drsnosti a vlnitosti. Pro získání profilů na normované vyhodnocované délce se užívá filtračních algoritmů, které dokáží jednotlivé složky struktury separovat, jak je vidět na obr. 9:



Obrázek 9, Filtrované složky povrchu [13] – upraveno
a) Drsnost b) Vlnitost c) Základní profil

Po provedení separace se zavádí tzv. střední čára. Ta rozděluje plochy omezené střední čarou a čarou profilu tak, aby součet ploch nad střední čarou byl co nejblíží součtu ploch pod střední čarou. Posléze je možné vyhodnocování jednotlivých parametrů profilu povrchu. Norma ČSN EN ISO 4287 rozlišuje parametry výškové, délkové a tvarové. [10] [11] [12]

a) Výškové parametry

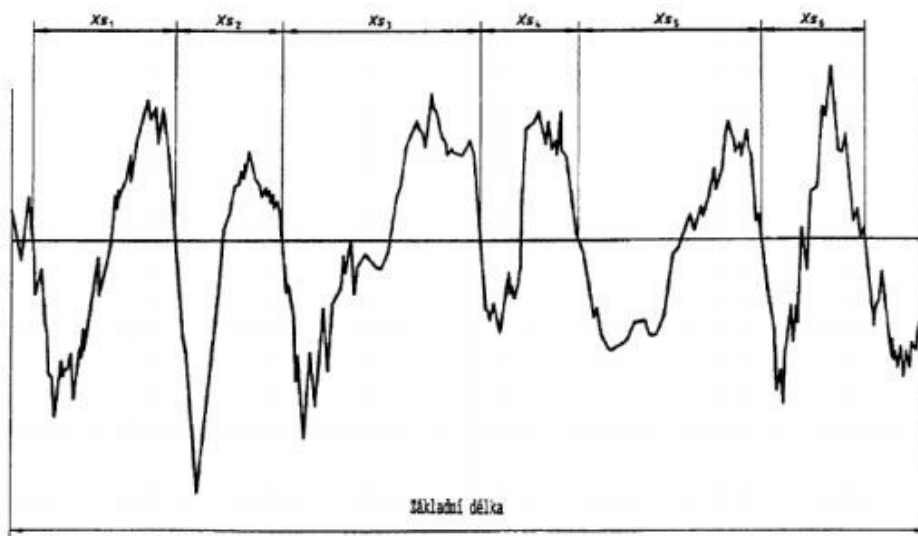
Mezi výškové parametry daného profilu se řadí například největší výška výstupku (R_p , W_p , P_p) nebo největší hloubka prohlubně (R_v , W_v , P_v). Významným zástupcem je parametr R_a . Definován je jako aritmetický průměr absolutních hodnot pořadnic získaných v rozsahu základní délky. [10] [11] [12]

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad (2)$$

Kde l je základní délka a $Z(x)$ je hodnota pořadnice.

b) Délkové parametry

Délkovým parametrem je definována průměrná šířka profilu (PSm , RSm , WSm), která je aritmetickým průměrem šířek jednotlivých prvků profilu v rozsahu základní délky. [10] [11] [12]



Obrázek 10, Průměrná šířka profilu [37]

$$PSm, RSm, WSm = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m x_{s_i} \quad (3)$$

c) Tvarové parametry

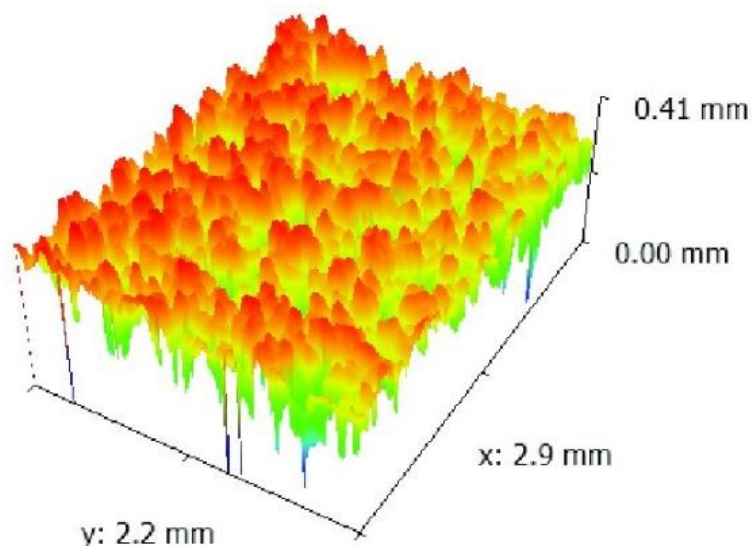
Tvarovým parametrem je průměrný kvadratický sklon profilu. Je dán vztahem:

$$P\Delta q, R\Delta q, W\Delta q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l \left(\frac{dZ}{dx} \right)^2 dx} \quad (4)$$

Kde l je základní délka a $Z(x)$ je hodnota pořadnice. [10] [11] [12]

Měření struktury povrchu se realizuje kontaktním a nekontaktním způsobem. U kontaktní metody sleduje tvar povrchu snímací hrot, který je v relativním posuvném pohybu vůči obrobku. Jeho poloha je převáděna na elektrický signál, který je vyhodnocen. Kontaktní měření neklade v porovnání s nekontaktní metodou tak velké požadavky na čistotu povrchu. Případné nečistoty jsou hrotem odstraněny. Omezující je velikost hrotu, který při přílišné velikosti nedokáže přesně kopírovat povrchovou strukturu. Bezkontaktní metoda

se nabízí v případech, kdy je snímáný povrch náchylný k mechanickému poškození. Mezi hlavní přednosti bezkontaktní metody je možnost snímání plošné drsnosti. Ta nabízí trojrozměrný obraz povrchu a možnost rozšíření popisu o nové parametry, díky čemuž může být povrch studován komplexněji. [10] [11] [12] [14]



Obrázek 11, Plošná drsnost [15]

3.2. Zbytková napětí

Velmi významnou složku integrity povrchu tvoří zbytková napětí. Tato residuální pnutí mají nezanedbatelný vliv na únavovou životnost součástí. Důležitost jejich znalosti při hodnocení jakosti povrchu podtrhuje fakt, že v praxi je velké množství lomů způsobených únavovými mechanismy. Je důležité zmínit, že zbytková napětí v povrchu mohou mít pozitivní i negativní vliv na zmiňovanou životnost. Bylo zjištěno, že tlaková zbytková pnutí svou orientací působí proti nukleaci trhlin na povrchu, čímž odolnost proti únavovému šíření trhliny zvyšují. Pozitivní vliv má tlakové pnutí i z hlediska korozního praskání. Opačný efekt mají tahová zbytková pnutí, která obecně životnost snižují a v důsledku jejich přítomnosti v povrchu může dojít ke vzniku trhlin. [8] [7]

Zbytkové napětí lze popsat jako napětí, které působí v součásti i po odeznění vlivů, které je zapříčinily. Těmito vlivy může být nerovnoměrný ohřev či ochlazení, nerovnoměrná plastická deformace, chemické procesy či nerovnoměrné strukturní změny. Součást s vnitřním pnutím je v silové a

momentové rovnováze. Tlakové napětí je vyrovnáváno napětím tahovým. Dle objemu, ve kterém dojde k vyrovnání, se napětí označují jako: [4] [16]

- a) Napětí I. druhu – rovnováha dosažena v makroobjemu
- b) Napětí II. druhu – rovnováha dosažena v objemu několika zrn
- c) Napětí III. druhu – rovnováha dosažena v objemu několika atomů

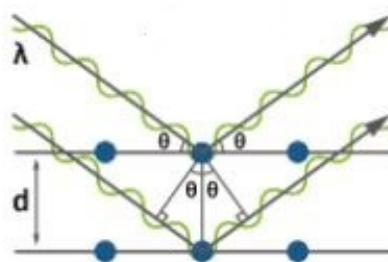
Jak bylo uvedeno v části práce zaměřené na oblast terciární plastické deformace, predikovat výsledný smysl a velikost zbytkových napětí není jednoduché. Nejblíže ke skutečnému napětíovému stavu vede měření. Způsobů měření je více, lze je rozdělit do třech kategorií – nedestruktivní, semidestruktivní a destruktivní. Popsány budou jen principy významných zástupců jednotlivých kategorií:

Nedestruktivní metody

Nedestruktivním měřením se součást neporušuje. Významné místo v praxi zaujímá metoda difrakce rentgenových paprsků. Principem je aplikace Braggova zákona, vyjádřeného rovnicí 5:

$$2d \sin \theta = k\lambda \quad (5)$$

Jednotlivé členy v rovnici odpovídají symbolům v obr. 12, který znázorňuje dopad a odraz rentgenového záření na povrch součásti.

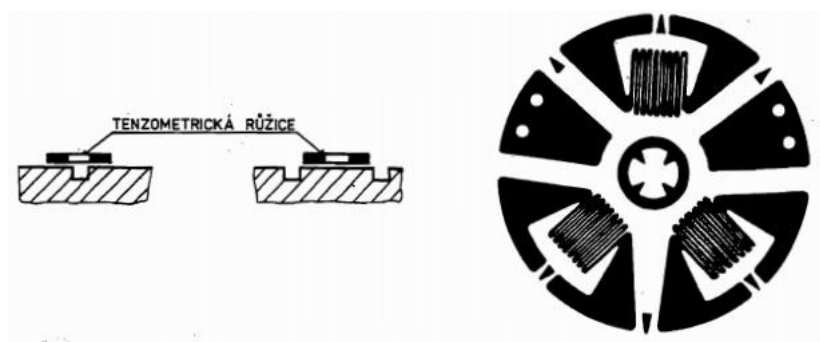


Obrázek 12, Princip difrakce rentgenových paprsků [17]

Člen d představuje vzdálenost mezi rovinami atomů, θ je difrakční úhel, λ je známá vlnová délka a k je přirozené číslo. Z dosazení změřeného difrakčního úhlu a známé vlnové délky do vztahu 5, lze dopočítat vzdálenost mezi atomovými rovinami d . Pro konkrétní materiály je tato vzdálenost v nezátíženém stavu známá. Ze změřené změny této základní délky se matematicky dovozuje napětí, kterému je deformovaná mřížka vystavena. [17] [18]

Semidestruktivní metody

Rozměrové a funkční parametry součásti jsou ovlivněny, avšak ne v celém objemu. Často se pro semidestruktivní měření napjatosti užívá materiálových přídavek pro měření, které jsou následně odstraněny. Mezi významného zástupce patří odvrtávací metoda. Principem je vytvoření díry do povrchu součásti se zbytkovým napětím. Tím dojde k narušení silové a momentové rovnováhy a uvolní se deformace, která je funkcí zbytkového pnutí. Tu zaznamená tenzometrická růžice. Z velikosti deformace je dovozeno zbytkové napětí. Jedná se o jednu z nejčastěji využívaných metod. [19]



Obrázek 13, Tenzometrická růžice [18]

Destruktivní metody

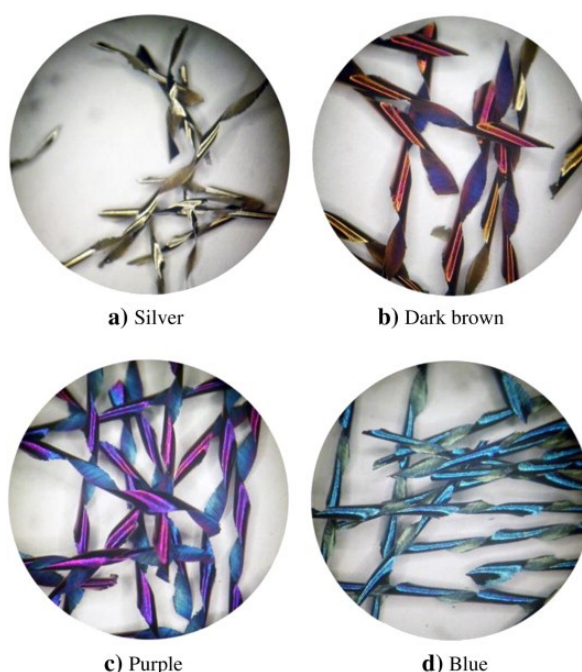
Zástupcem této kategorie je metoda postupného odstraňování povrchové vrstvy. Princip je velmi podobný principu semidestruktivní metody otvoru popsané v předchozím odstavci. Při postupném odstraňování jednotlivých vrstev se vlivem uvolnění napětí generuje deformace, která je snímána. Získán je průběh deformace v závislosti na hloubce pod povrchem. Odstraňování vrstev musí probíhat tak, aby nebylo zaneseno další pnutí do jednotlivých vrstev. Využívá se chemických nebo elektrochemických způsobů. [18]

3.3. Strukturní změny a opaly

Za běžných podmínek při obrábění nedochází k strukturním změnám. Důvodem je nedosažení požadované teploty a času, aby ke změnám došlo. Z ekologických důvodů lze v současné době pozorovat trend vedoucí k využívání řezných kapalin v menší míře. V případě tzv. suchého obrábění (bez procesních kapalin) či při vysokých řezných rychlostech, jsou měřené teploty při obrábění v řádu stovek až tisíc stupňů Celsia a ke strukturním změnám v takových případech docházet může. [8]

Broušení je technologickou operací, při které k strukturním změnám typicky dochází. Velmi náchylné ke strukturním změnám jsou materiály s nízkou tepelnou vodivostí, mezi které patří například slitiny titanu. Nesprávné podmínky mohou zapříčinit změnu poměru strukturních složek α a β , čímž dojde k ovlivnění vlastností povrchu. [8]

Vlivem vyššího teplotního namáhání dochází na povrchu obrobené plochy k vzniku oxidů obráběného kovu – opalů. Ty jsou specifické svou barvou, při relativně nižším teplotním namáhání jsou zabarveny do žlutohnědé, při vysokém teplotním namáhání mohou mít sytě modrou barvu. Možné zbarvení je ilustrováno na obr. 14. Výskyt těchto opalů může být lokální nebo na celém obrobeném povrchu. [8]



Obrázek 14, Barevné variace povrchu třísky, zvětšení x20 [20]

S odkazem na předchozí kapitolu a zbytkovém napětí je třeba zmínit, že strukturní změny je třeba uvažovat v kontextu se zbytkovým pnutím. Změna strukturní fáze může být doprovázena změnou měrného objemu, což je jedním možným způsobem vzniku vnitřního pnutí. [6]

3.4. Tvrdost

Tvrdostí se označuje mechanická vlastnost materiálu vyjadřující jeho odpor k vnikání cizorodého tělesa. V praxi se její hodnota získává jednoduše proveditelnou nedestruktivní zkouškou. Získaná hodnota tvrdosti může sloužit i pro predikci jiných mechanických vlastností, například meze pevnosti v tahu, meze kluzu v tahu či Youngova modulu pružnosti v tahu. Pro popis integrity povrchu je hodnota tvrdosti zajímavá pro popsání průběhu zpevnění v povrchové vrstvě po obrábění. [21] [5] [22]

Normalizovaných zkoušek tvrdosti je více. Obecně je lze rozdělit dle jejich principu na zkoušky vnikací, vrypové, odrazové či kyvadlové. Nejběžnější jsou zkoušky vnikací, jejichž principem je vytvoření vtisku na upraveném povrchu zkoušeného tělesa. Vzhledem k praktické části této práce bude následující text pojednávat pouze o zkouškách vnikacích. Vtisk vytváří indenter – vnikací těleso definované geometrií a materiálem. Dále lze členit zkoušky dle rychlosti a velikosti zatěžující síly. Právě velikost zatěžující síly F spolu s hloubkou vtisku h vymezuje dle normy ČSN EN ISO 14577-1 tři rozsahy tvrdosti: [23] [24]

- rozsah makro: $2 \text{ N} \leq F \leq 30 \text{ kN}$;
- rozsah mikro: $2 \text{ N} > F$; $h > 0,2 \text{ mm}$;
- rozsah nano: $h \leq 0,2 \text{ mm}$.

Mezi nejčastější vnikací zkoušky v makro rozsahu patří zkouška dle Rockwella, Brinella a Vickerse. Jednotlivé jmenované zkoušky budou přiblíženy v následujících odstavcích. [24]

Před samotným zkoušením je třeba zajistit izolaci měřícího systému od vnějších vlivů, které by mohly negativně ovlivnit výsledky. Mezi ně patří například proměnná teplota nebo vibrace.

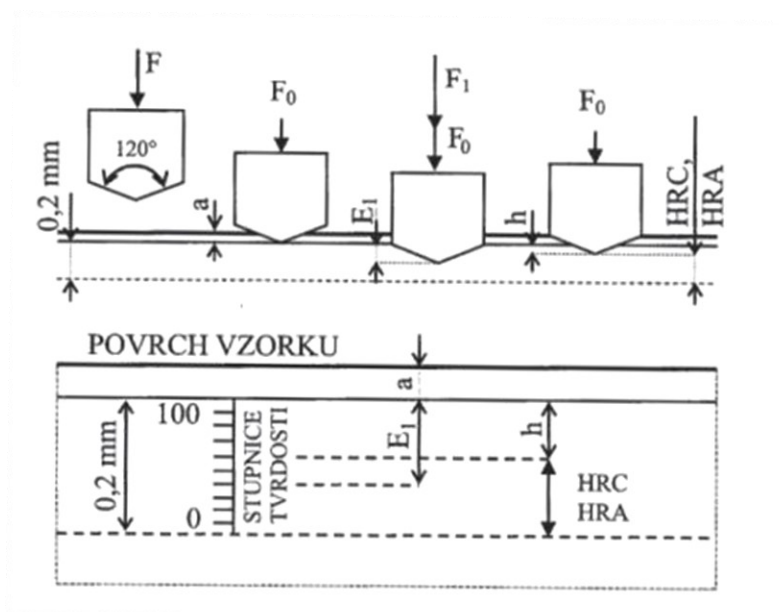
Zkouška tvrdosti dle Rockwella

Metoda zkoušky tvrdosti dle Rockwella je definována normou ČSN EN ISO 6508-1. Dle očekávané oblasti tvrdosti jsou rozlišovány stupnice tvrdosti, které se vzájemně odlišují silovým průběhem při zkoušce a indentorem, kterým může být kulička nebo diamantový kužel. Konkrétní stupnice dle Rockwella jsou popsány v tabulce 2: [24]

Tabulka 2, Stupnice dle Rockwella [24]

Stupnice tvrdosti podle Rockwella	Značka tvrdosti	Typ vnikacího tělesa	Předběžné zkušební zatížení F_0 [N]	Přídavné zkušební zatížení F_1 [N]	Celkové zkušební zatížení F [N]	Oblast použití (tvrdost podle Rockwella)
A	HRA	diamantový kužel	98,07	490,3	588,4	20 - 88 HRA
B	HRB	kulička 1,587 mm	98,07	882,6	980,7	20 - 100 HRB
C	HRC	diamantový kužel	98,07	1 373	1 471	20 - 70 HRC

Nejprve je povrch zkušebního tělesa zatížen předběžnou silou F_0 , vlivem které se dostane hrot indentoru pod povrch. Následně je síla F_0 zvětšena o hodnotu přídavného zkušebního zatížení F_1 . Po ustálení je toto celkové zatížení sníženo o hodnotu F_1 a je odečtena hloubka indentoru. Z té je následně přepočtena hodnota tvrdosti dle Rockwella, která je této hloubce nepřímo úměrná. Silový průběh zatížení je zachycen na obrázku obr. 15: [24]



Obrázek 15, Schéma zatěžování [24]

Tvrdot dle Rockwella se značí následovně:

A HRB

A představuje hodnotu tvrdosti odečtenou rovnou z tvrdoměru. **HR** indikuje, že tvrdost byla získána metodou dle Rockwella a **B** je označení pro užitou stupnici (A, B, C...). [24]

Zkouška tvrdosti dle Brinella

Metoda zkoušky tvrdosti dle Brinella je definována normou ČSN EN ISO 6506-1. Mírou tvrdosti je střední průměr vtisku d , který při zkoušce vytváří sférický indentor z tvrdokovu. Průměr kulového indentoru D je normalizovaný ve velikostech 10; 5; 2,5 a 1 mm a je volen na základě velikosti zkušebního tělesa. Zátěžná síla F je volena tak, aby jednotlivé průměry vtisku d náležely intervalu $0,24D - 0,6D$. Pokud by se za stejných podmínek aplikovala jiná zátěžná síla, hodnota tvrdosti dle Brinella by byla různá, to protože si vtisky nezachovávají geometrickou podobnost. Standardní doba, po kterou je povrch zkušebního tělesa zatížen indentorem, je 10-15 vteřin. Po získání hodnoty středního průměru vtisku je tvrdost dle Brinella dána vztahem: [24] [25]

$$HBW = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (6)$$

Kde D [mm] je průměr kulového indentoru, F [N] je síla působící na indentor a d [mm] je průměr vtisku.

Tvrdost dle Brinella se značí následovně:

C HBW D/E/F

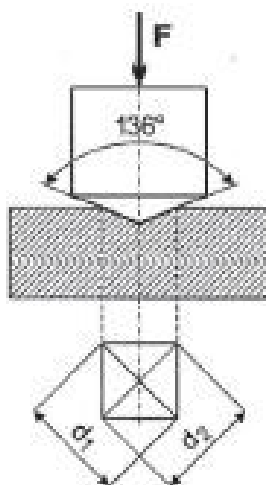
C představuje hodnotu tvrdosti získanou rovnicí 2. HBW indikuje, že tvrdost byla získána metodou dle Brinella. **D** je hodnota průměru kuličky indentoru. Na místě **E** se udává zatížení v kilopondech¹ a na pozici **F** se udává doba zatížení, pokud není standardně 10-15 vteřin. [24]

Zkouška tvrdosti dle Vickerse

Metoda zkoušky tvrdosti dle Vickerse je definována normou ČSN EN ISO 6507-1. Vtisk vytváří pravidelný čtyřboký jehlan z diamantu s vrcholovým úhlem 136° , který působí na povrch zkoušeného tělesa silou F , viz obr. 16. Hodnota tvrdosti v makro rozsahu není závislá na velikosti zatěžující síly, jako je tomu u metody dle Brinella. Standardní doba zatížení je 10–15 vteřin. Pokud je vytvářena série vtisků na jednom zkušebním vzorku, je třeba dodržovat minimální vzdálenost mezi jednotlivými vtisky, která je normou dána jako trojnásobek

¹ Poznámka – 1 kilopond odpovídá 9,81 N

úhlopříčky vtisku d (pro ocel, měď a její slitiny). Pro lehké kovy, olovo, cín a jejich slitiny je tato vzdálenost rovná šestinásobku úhlopříčky vtisku d . Definována je i minimální tloušťka zkušebního vzorku – $1,5 d$. [24] [25]



Obrázek 16, Schéma měření dle Vickerse [24]

Po vytvoření vtisku se měří jeho úhlopříčky d_1 a d_2 , jejichž aritmetický průměr d je použit k určení tvrdosti dle Vickerse dle vztahu 7: [24]

$$HV = 0,1891 \frac{F}{d^2} \quad (7)$$

Tvrlost dle Vickerse se značí následovně:

G HV H/I

G je hodnota tvrdosti určená ze vztahu (7. **HV** indikuje, že tvrdost byla získaná metodou dle Vickerse. Na pozici **H** je udávána zatěžující síla v kilopondech a na pozici **I** se udává doba zatížení, pokud není standardně 10-15 vteřin. [24]

4. Mikrotvrдость

V některých případech je žádané získat hodnotu tvrdosti na malé ploše. Například to mohou být požadavky na hodnotu tvrdosti jednotlivých strukturních složek materiálu nebo je třeba provést vtisk na velmi malých součástech. V takovýchto případech se měří tvrdost v rozsahu mikro nebo nano v závislosti na konkrétních podmínkách. Snižuje se tedy hodnota zatěžující síly a vytváří se menší vtisk. V následujícím textu bude popsán rozsah mikrotvrđosti.

Z porovnání hodnot mikrotvrđosti a makrotvrđosti vyplývá, že hodnoty mikrotvrđosti jsou větší než hodnoty makrotvrđosti. Příčinou je Indentation Size Effect (vliv velikosti vtisku). Se zmenšující se zatěžující silou roste podíl elastické deformace na celkové deformaci, což je hlavní příčinou tohoto efektu. Po odlehčení se vtisk zmenší o elastickou část deformace, což je v rozměru mikro (na rozdíl od makro) nezanedbatelná změna rozměru vtisku. Toto „odpružení“ v důsledku znamená větší naměřenou hodnotu tvrdosti. Byl však popsán i tzv. Reverse Indentation Size Effect – v mikro rozsahu se za určitých podmínek s rostoucí aplikovanou silou zvětšuje i hodnota tvrdosti. Dokonalé objasnění tohoto jevu je stále předmětem diskuse. Jedním z modelů, který by tento fenomén u křehkých materiálů vysvětloval, je Indentation-induced cracking (IIC). V momentě dosažení největší síly vyvíjené na zkušební těleso je celkový odpor materiálu proti této síle závislý na tření na styčných plochách, elastické deformaci, plastické deformaci a vzniku trhlin. Při vzniku trhlin inklinuje závislost tvrdosti na zatěžující síle spíše k reverznímu vlivu velikosti vtisku. Pro měření v rozsahu mikrotvrđosti se využívá mimo jiné i metoda podle Vickerse. [25] [26]

Zkouška mikrotvrđosti dle Vickerse

Princip zkoušky je shodný s principem zkoušky dle Vickerse v rozsahu makro. Postup předepisuje stejná norma – ČSN EN ISO 6507-1. Užívá se stejného indentoru a tvrdost je funkcí zatěžující síly a průměru úhlopříček vtisku dle vztahu 7. Pro porovnání zkušebního zatížení je přiložena tab. 3:

Tabulka 3, Rozsah zkušebního zatížení pro metodu dle Vickerse [27]

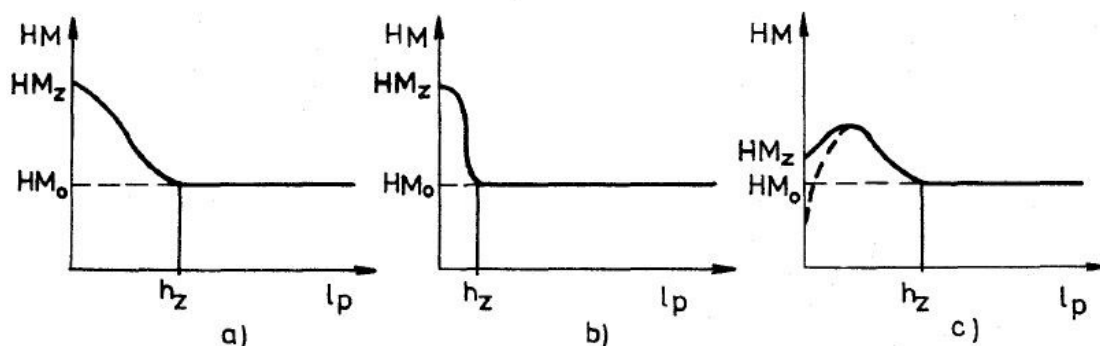
Rozsahy zkušebního zatížení F [N]	Značka tvrdosti	Název
$F \geq 49,03$	$\geq HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse
$1,961 \leq F < 49,03$	$HV 0,2 \text{ až } < HV 5$	Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení
$0,09807 \leq F < 1,961$	$HV 0,01 \text{ až } < HV 0,2$	Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse

Povrch vzorků musí být lesklý, velká hodnota drsnosti by mohla být zdrojem nepřesnosti měření. [27]

Pro měření úhlopříček vtisku slouží optický měřicí systém, kterým může být například optický mikroskop nebo CCD kamera.

4.1. Hloubka a stupeň zpevnění

K popisu zpevnění slouží právě hodnoty mikrotvrdosti v závislosti na hloubce od povrchu. V následujícím obrázku jsou zachyceny tři typické průběhy: [4] [6]



Obrázek 17, Průběh zpevnění styk [4]

- V tomto případě hodnota mikrotvrdosti klesá pozvolně až na mikrotvrdost nezpevněného jádra HM_0 . Povrchová vrstva s takovým průběhem zpevnění je soudržná s jádrem materiálu. [4] [6]
- Z grafu je zřejmý velmi prudký pokles hodnot mikrotvrdosti v porovnání s předchozím grafem. V takovém případě není soudržnost povrchové vrstvy s jádrem značná. [4] [6]

- c) V této variantě průběhu pevnosti je možno sledovat třikrát změnu monotonie průběhu. Prvotní nárůst a následný pokles před dosažením hloubky zpevnění h_z naznačuje rozrušení povrchové vrstvy. Nejsvrchnější vrstva má pak zhoršené únavové vlastnosti a jak je z obrázku patrné, může nabývat i nižší mikrotvrdosti, než jakou vykazuje nezpevněné jádro materiálu. [4] [6]

Charakter průběhu mikrotvrdosti může být rozmanitý. Ze záznamu průběhu mikrotvrdosti lze vyhodnotit hloubku zpevněné vrstvy h_z (označené v obr. 17). Tato hloubka je definována mikrotvrdostí odpovídající mikrotvrdosti jádra HM_o . Při analýze zpevnění je také užíván stupeň zpevnění K_z , který je definován jako: [4]

$$K_z = \frac{HM_z - HM_o}{HM_o} \cdot 100 [\%] \quad (8)$$

4.2. Aplikované způsoby přípravy vzorků

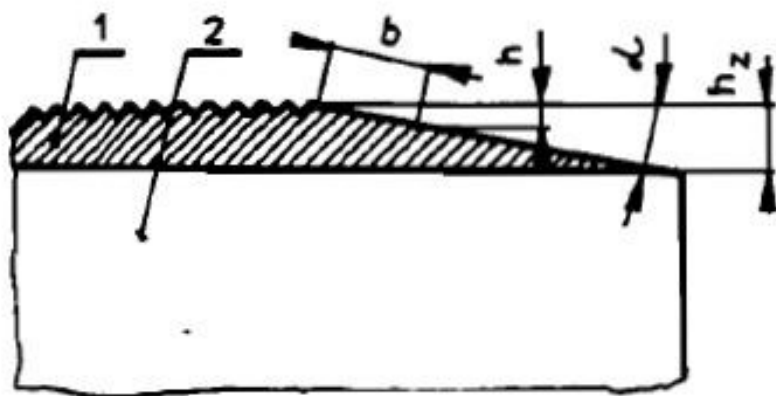
Vlastní příprava vzorků pro měření hloubky a stupně zpevnění je odlišná pro rovinné a válcové povrchy. Obecně platí, že má-li vzniknout plocha zasahující do hloubky materiálu, je třeba ji připravit tak, aby byl materiál přípravou co nejméně ovlivněn a výsledky měření tak nebyly zkreslené. Obvyklým způsobem je řez na metalografické pile nebo chemické a elektrochemické odleptávání.

Rovinné povrchy

K získání těchto hodnot na plochých tělesech se využívá metody šikmého řezu. Principem je vytvoření zešikmení, které je definováno úhlem α vůči rovině povrchu vzorku. Vtisky se provádí na seříznuté ploše, přičemž se každé naměřené hodnotě mikrotvrdosti přiřadí hloubka pod povrchem h dle vztahu:

$$h = b \cdot \sin(\alpha) \quad (9)$$

Člen b představuje polohu vtisku měřenou od počátku řezu rovnoběžně se zešikmenou plochou dle obr. 18. [18]

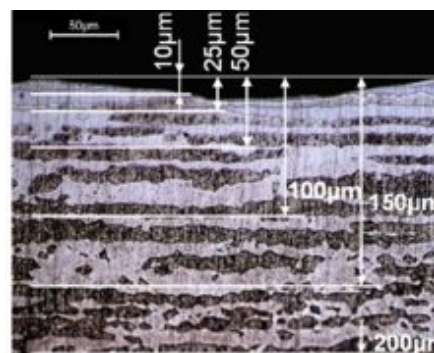
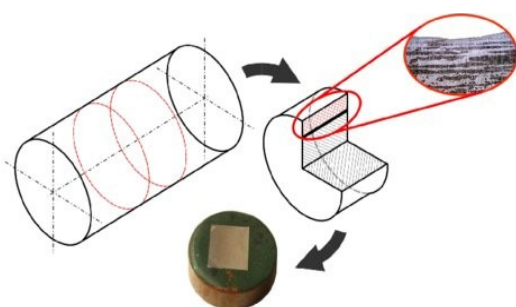


Obrázek 18, Metoda šikmého řezu [18]

1 – zpevněná vrstva; 2 – nezpevněné jádro materiálu

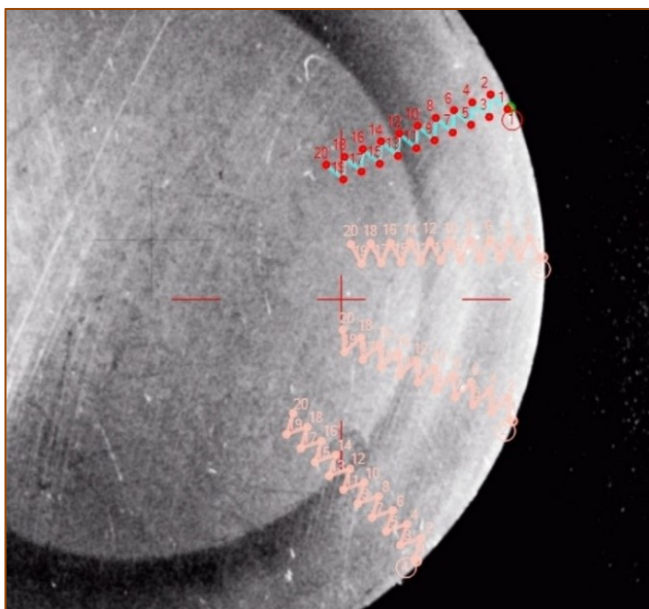
Válcové povrchy

Metoda šikmého řezu se obvykle neaplikuje na válcové povrchy a v těchto případech je tedy nutné využít jinou metodiku měření. Řada autorů [28] [29] [30] užívá obvykle způsob přípravy vzorků z válcových těles, který jeden z autorů schematicky znázorňuje na obr. 19. Odtud je patrné, že se vyřízne válcová výseč, na které jsou následně prováděny vtisky ve směru kolmém k povrchu. Hloubka pod povrchem h je dána kolmou vzdáleností k povrchu. Metoda měření na válcové výseči přesné provedení řezu. V případě, že by řez nebyl veden osou zkušebního válce, došlo by k chybě v podobě přiřazení špatné souřadnici hloubky naměřené hodnotě tvrdosti.



Obrázek 19, Příprava vzorku pro měření mikrotvrdosti [28] – upraveno

Možnou alternativou je vytvoření řezu rovinou rovnoběžnou s čelem válce určeného pro přípravu vzorků. Vtisky se provádí ve směru normály k povrchu, jak je zřejmé z obr. 20. Hloubka pod povrchem h se rovněž odměřuje v normálním směru vůči povrchu. Možným úskalím této metody může být obtížné určení polohy středu, v jehož směru musí být vedeny řady vtisků.



Obrázek 20, Alternativní metoda [31]

Pro obě metody aplikované na válcové povrchy platí, že poloha vtisku měřená od povrchu, je rovna hloubce pod povrchem. Pro měření tenké zpevněné vrstvy by však bylo vhodné, aby vzdálenost dvou vtisků byla větší než přírůstek hloubky mezi nimi. Pak by bylo možné naměřit v rámci jedné řady detailnější průběh zpevnění.

5. Shrnutí teoretické části

Strukturou teoretické části práce je popis vzniku obrobené plochy a následné hodnocení její kvality. Byly zavedeny základní pojmy z tématu obrábění, které byly následně využité pro popis vzniku třísky. Tvorba třísky byla v potřebném rozsahu popsána, styčnými body při popisu byly tři oblasti plastické deformace. Tyto oblasti byly teoreticky popsány se snahou vytknout ta fakta, která jsou v relaci k obrobenému povrchu. Považuji za důležité zdůraznit charakter styku nástroje a obráběného materiálu – definován byl plošný a bodový styk. K plošnému styku dochází při intenzivnímu mechanickému a teplotnímu namáhání, řezné kapaliny se nedostávají mezi nástroj a obrobek, což má na kvalitu obrobeného povrchu přímý vliv.

V části zabývající se hodnocením kvality obrobené plochy je klíčové slovo integrita povrchu. Byly popsány její jednotlivé složky a metody jejich měření. Zvláštní pozornost pak byla věnována tvrdosti a mikrotvrdosti. Podstatným závěrem je, že hodnoty tvrdosti měřené při různých zatíženích lze vzájemně porovnávat pouze tehdy, vytváří-li indenter geometricky podobné vtisky. Stejně důležitým výstupem je fakt, že v rozsahu mikrotvrdosti jsou měřené hodnoty větší než hodnoty získané za stejných podmínek v rozsahu makrotvrdosti. Byly jmenovány aplikované způsoby přípravy ploch pro měření mikrotvrdosti.

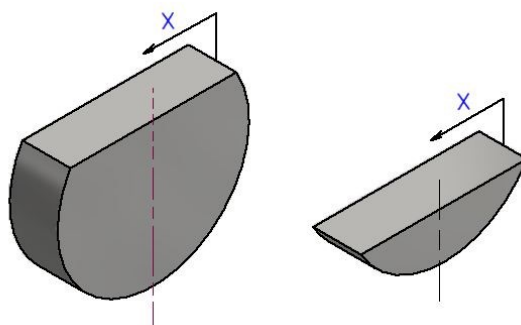
6. Návrh a ověření metodiky měření průběhu zpevnění na rotačních dílcích

V návaznosti na vyjmenování nedostatků aplikovaných metod přípravy měřících ploch na rotačních dílcích, bude navržena alternativní metodika, s cílem eliminovat zmíněné nedostatky. Snahou bude vytvořit technologicky nenáročným způsobem takovou plochu pro měření, na které bude vzdálenost dvou vtisků větší než přírůstek hloubky mezi nimi. Na ploše splňující tyto vlastnosti bude možné získat v rámci jedné řady více dat pro zjištění průběhu zpevnění v porovnání s dříve jmenovanými metodami. To bude pro zjištění obráběním způsobeného zpevnění výhodné, jelikož ovlivněná vrstva je relativně tenká. Vlastní návrh bude sledovat následovnou chronologii – nejprve bude navržen princip vyhodnocení a odpovídající podoba vzorku s návrhem výroby. Cíl je získat plochu, na které vzdálenost dvou vtisků neodpovídá přírůstku hloubky pod povrchem. Relaci mezi polohou vtisku a odpovídající hloubkou pod povrchem je třeba znát, proto bude navazovat teoretický rozbor tohoto vztahu. Dle návrhu budou vytvořeny plochy pro měření mikrotvrdosti a bude sestavena vhodná sestava pro měření průběhu zpevnění. Metodika bude ověřena její aplikací při měření průběhu zpevnění.

6.1. Návrh principu vyhodnocení a podoby vzorku

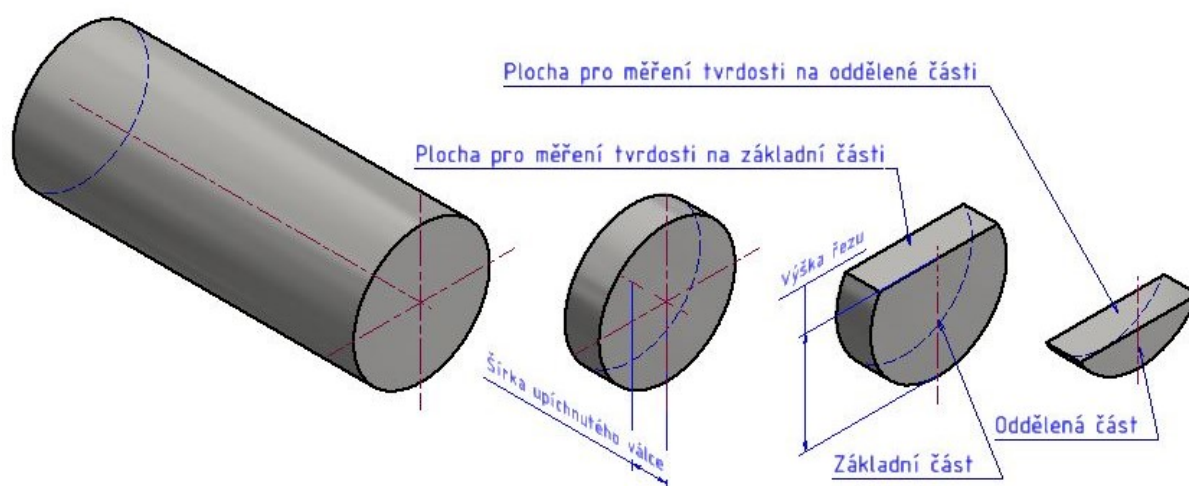
Klíčovou otázkou je způsob získání plochy s proměnnou hloubkou pod povrchem, na které by platila dříve specifikovaná relace mezi vzdáleností dvou vtisků a přírůstkem hloubky mezi nimi. Pro získání plochy pod povrchem je třeba provést řez materiálem. Řez, který splňuje výše zmíněný požadavek, je řez vedený rovinou kolmou k čelu rotačního dílce². [32] Rozdělením rotačního dílce na dvě části vznikají dvě plochy pro měření mikrotvrdosti, na kterých by se řady vtisků prováděly rovnoběžně s delší hranou této plochy. Rozdělení materiálu řezem vedeným kolmo na čelo rotačního dílce je znázorněno na obr. 21. Pro určení polohy vtisku (a znázornění směru vedení řady vtisků) je zavedena souřadnice x , která je rovněž zobrazena na obr. 21.

² Naznačení takového řezu bylo nalezeno v citované publikaci.



Obrázek 21, Rozdělení rotačního dílce provedením kolmého řezu

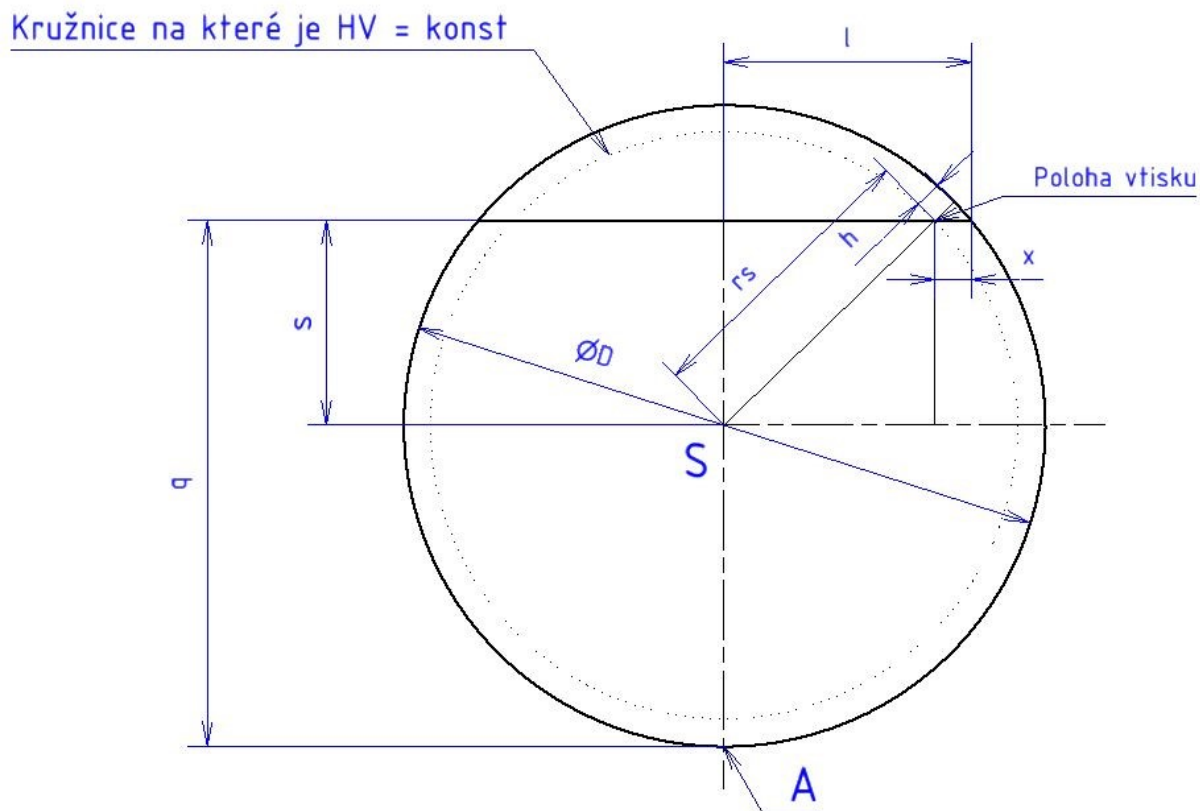
Schéma přípravy vzorku je na obr. 22. V první fázi se na soustruhu operací upichování (nebo jinou dělicí operací) oddělí válec o zvolené šířce, na kterém bude hledána distribuce mikrotvrlosti pod povrchem. Větší šířka separovaného válce dovoluje provedení více řad vtisků vedle sebe a podrobnější popis průběhu zpevnění. Následuje provedení řezu rovinou kolmou k čelu separovaného válce. Poloha řezu (vzdálenost od osy rotace) určuje maximální dosažitelnou hloubku pod povrchem a také velikost vzniklé plochy. S rostoucí vzdáleností polohy řezu od osy se zmenšuje délka pro měření a klesá také maximální dosažitelná hloubka pod povrchem h . K měření je vhodné využít i řezem oddělenou část. Pro jasnou terminologii bude v souladu s označením na obr. 22 dále rozlišována základní část a jí náležící plocha pro měření mikrotvrlosti a oddělená část a jí náležící plocha pro měření mikrotvrlosti.



Obrázek 22, Příprava plochy pro měření průběhu zpevnění

6.2. Teoretický rozbor vztahu mezi polohou na řezu a hloubkou pod povrchem

Pro přiřazení hloubky od povrchu h každému vtisku definovanému svou polohou x , je třeba odvodit z geometrické analýzy čelního pohledu na vzorek funkci $h=f(x)$.



Obrázek 23, Schéma pro odvození funkce $h=f(x)$

Veškeré kótované rozměry shrnuje a pojmenovává tab. 4.

Tabulka 4, Popis kótovaných rozměrů Obrázek 23

Rozměr	Popis
l	Délka pro měření
x	Poloha vtisku
h	Hloubka od povrchu
r_s	Vzdálenost vtisku od středu S
$\varnothing D$	Průměr zkušebního válce
s	Poloha řezu od středu S
q	Poloha řezu od bodu A

Nyní budou přiřazeny vztahy jednotlivým prvkům, uvažujeme-li, že průměr vzorku D a poloha řezu q jsou vstupními parametry:

$$s = q - \frac{D}{2} \quad (10)$$

$$l = \frac{D}{2} \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

$$\alpha = \sin^{-1} \left(\frac{2s}{D} \right) \quad (12)$$

$$|rs| = \sqrt{(l-x)^2 + s^2} \quad (13)$$

$$h = \frac{D}{2} - |rs| \quad (14)$$

$$h = \frac{D}{2} - \sqrt{(l-x)^2 + s^2} \quad (15)$$

Ze vztahu 15 lze úpravou vyjádřit i funkci $h=f(x)$. Pro zjednodušení úpravy je výhodné zavést místo průměru vzorku D jeho poloměr r (vztah 16) a rozdíl $l-x$ nahradit doplňkovou souřadnicí y . Doplňková souřadnice y představuje doplněk k souřadnici x do rozměru l (vztah 17). Psáno:

$$r = \frac{D}{2} \quad (16)$$

$$x + y = l \rightarrow y = l - x \quad (17)$$

$$h = r - \sqrt{y^2 + s^2} \quad (18)$$

$$\sqrt{y^2 + s^2} = r - h \quad (19)$$

$$y^2 + s^2 = (r - h)^2 \quad (20)$$

$$y^2 = (r - h)^2 - s^2 \quad (21)$$

$$y = \sqrt{(r - h)^2 - s^2} \quad (22)$$

$$x = l - \sqrt{\left(\frac{D}{2} - h\right)^2 - s^2} \quad (23)$$

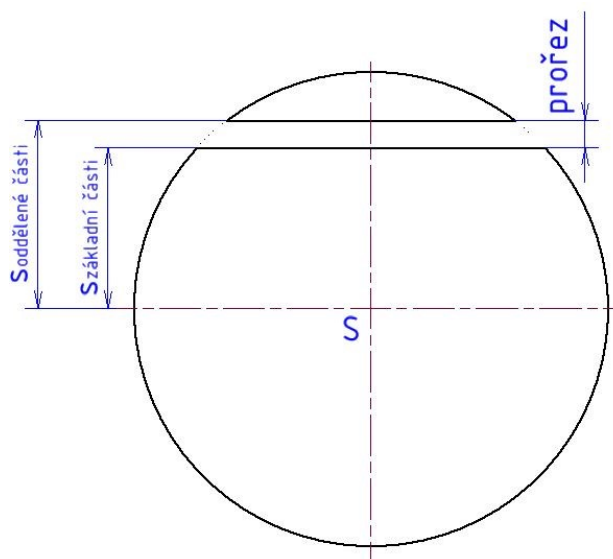
Pomocí vztahu 15 je možné dosazovat jednotlivé zvolené souřadnice poloh vtisků x a získat pro ně odpovídající hloubku pod povrchem h .

Výpočet dle vztahu 23 umožňuje měření s konstantním přírůstkem hloubky do materiálu. Pro zvolenou hodnotu hloubky pod povrchem určuje polohu vtisku právě souřadnice x . Při měření s konstantním hloubkovým krokem je však třeba zkontrolovat, zda vzdálenost dvou vtisků není menší než minimální normou stanovená³.

³ Minimální vzdálenost dvou vtisků je definována normou ČSN EN ISO 6507-1

Při aplikaci funkce $h=f(x)$ na ploše oddělené části nelze uvažovat stejnou polohu řezu (s, q) jako pro základní část. Řez je totiž při odvození vztahů uvažován jako rovina, což je idealizace neodpovídající realitě. Při zanedbání prořezu kotouče by došlo k výpočtu chybných hodnot hloubky pod povrchem h na ploše oddělené části. Důsledkem takového zanedbání by pak mohl být netotožný průběh tvrdosti na obou plochách. Zohlednění prořezu se jednoduše promítne ve vztahu 15 (případně ve vztahu 23) přičtením jeho velikosti k poloze řezu (s) dosazené při výpočtu pro plochu základní části. Psáno:

$$S_{\text{oddělené části}} = S_{\text{základní části}} + \text{prořez} \quad (24)$$



Obrázek 24, Implementace prořezu

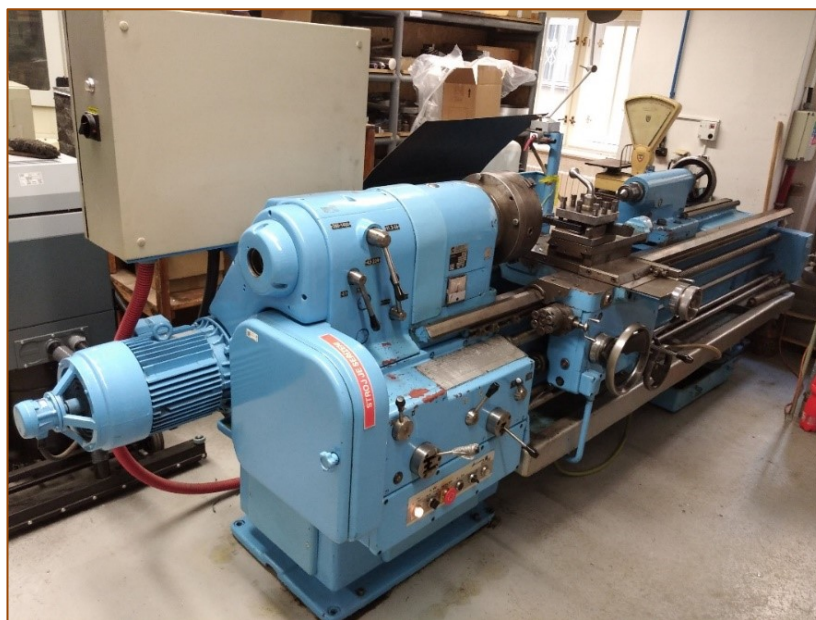
6.3. Příprava vzorků

Získané vztahy byly aplikovány při praktickém ověření metodiky. Měření hloubky zpevnění metodou kolmého řezu bylo provedeno na dvou materiálech – oceli 12050 a slitině titanu Ti6Al4V (grade 5). Výběr orientačních hodnot mechanických vlastností obou materiálů uvádí tab. 5. [33] [34]

Tabulka 5, Výběr mechanických vlastností obou materiálů

Mechanické vlastnosti	Modul pružnosti E [GPa]	Mez kluzu R_e [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Tažnost A_5 [%]
ocel 12050	221	min. 305	min. 530	16
Ti6Al4V	114	min. 825	min. 895	18

Polotovarem obou materiálů byla kruhová tyč. Průměr polotovaru Ti6Al4V byl 145 mm, průměr polotovaru oceli 12050 byl roven 65 mm. Oba dílce byly ortogonálně soustruženy na konvenčním soustruhu SU50, důsledkem čehož bylo očekáváno, že dojde ke zpevnění povrchové vrstvy, které bude předmětem měření.



Obrázek 25, Soustruh SU50

Řezná rychlost v_c , posuv f i šířka záběru ostří a_p byly navoleny pro soustružení obou materiálů identicky.

Tabulka 6, Řezné podmínky

Řezné podmínky	v_c [m/min]	f [mm/ot]	a_p [mm]
Ocel 12050	35	0,2	5
Ti6Al4V	35	0,2	5

Vzhledem k rozdílným průměrům polotovarů, bylo třeba navolit vhodný finální průměr obou vzorků s ohledem na soustruhem dosažitelné otáčky. Vztah (25) dává do relace obvodovou (řeznou) rychlost v_c [m/min], průměr D [mm] a otáčky n [1/min].

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (25)$$

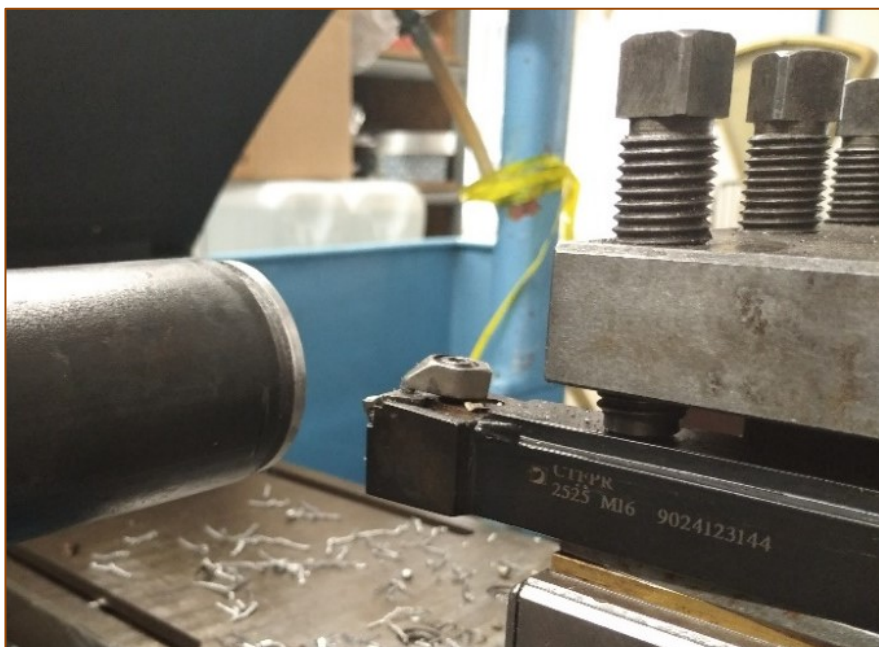
Z tohoto vztahu lze jednoduchou úpravou vyjádřit vhodný finální průměr D při dosazení soustruhem realizovatelných otáček.

$$D = \frac{1000 \cdot v_c}{\pi \cdot n} [mm] \quad (26)$$

$$D_{Ti6Al4V} = \frac{1000 \cdot 35}{\pi \cdot 90} \doteq 123,8 \text{ mm} \quad (27)$$

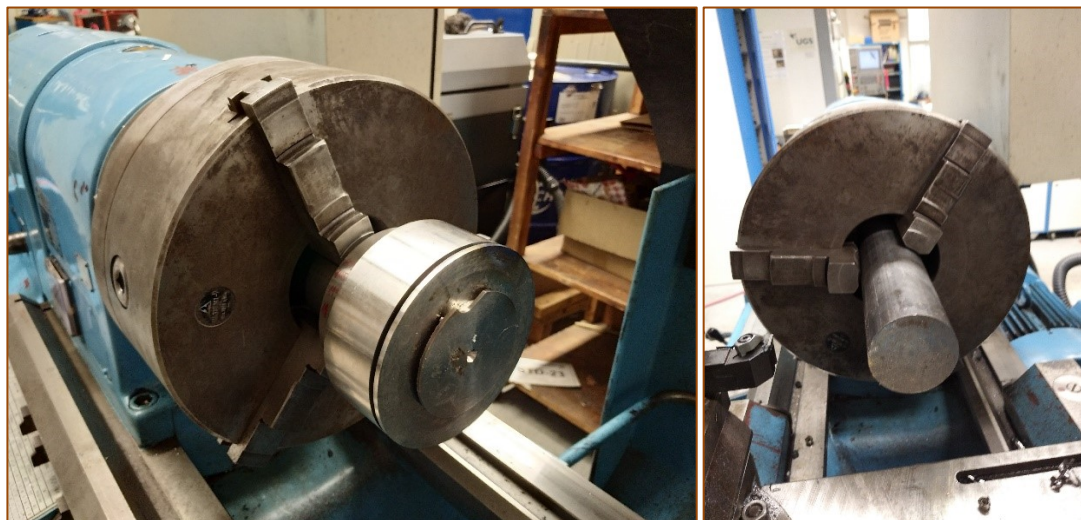
$$D_{12050} = \frac{1000 \cdot 35}{\pi \cdot 180} \doteq 62 \text{ mm} \quad (28)$$

Pro dosažení vypočteného průměru byla využita vyměnitelná břitová destička ze slinutého karbidu s označením TPGN160308 TH10, která byla pomocí upínky připevněna k noži s označením CTFPR 2525 M16. Bližší geometrická specifikace soustružnického nože i vyměnitelné břitové destičky je součástí Přílohy 1.



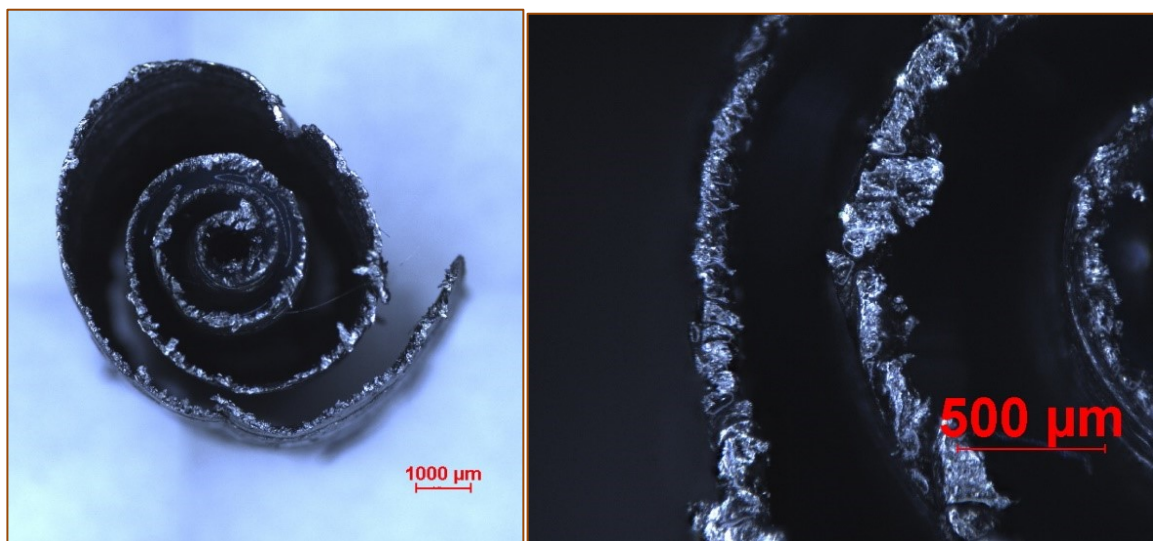
Obrázek 26, Nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou

Polotovary byly upnuty v tříčelistovém sklíčidle, jak je zdokumentováno na obr. 27. Během řezného procesu byla využita řezná kapalina za účelem redukce opotřebení nástroje a snížení teploty v místě řezu.

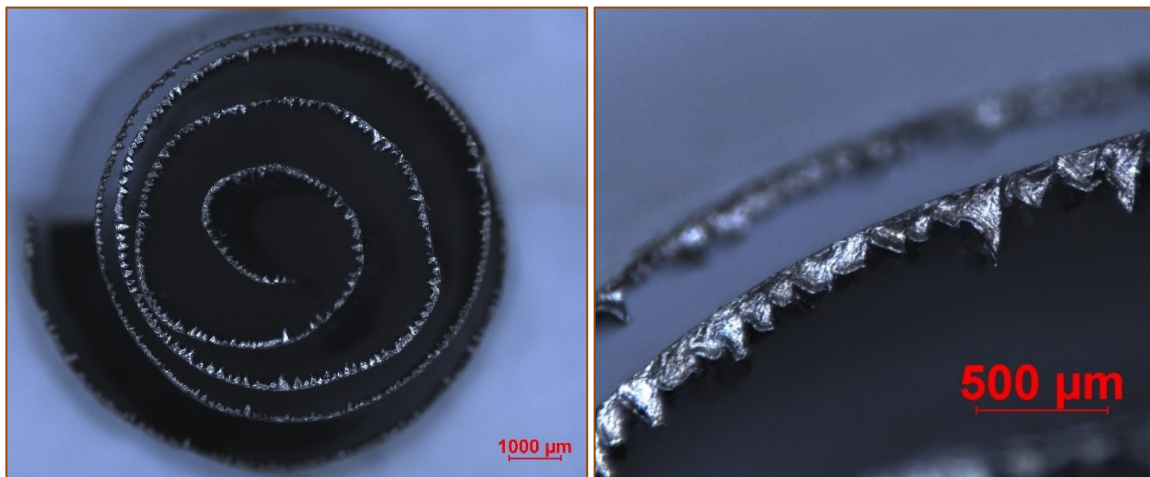


Obrázek 27, Upnutí do sklíčidla – vlevo Ti6Al4V, vpravo ocel 12 050

Vzniklou třísku lze v obou případech označit dle tab. 1 (kapitola Morfologie třísky) jako spirálovou kuželovitou, tento tvar je obecně vzato vhodným tvarem. Na optickém mikroskopu s CCD kamerou byly pořízeny snímky vzorků vzniklé třísky pro ocel 12050 (obr. 28) a pro Ti6Al4V (obr. 29).

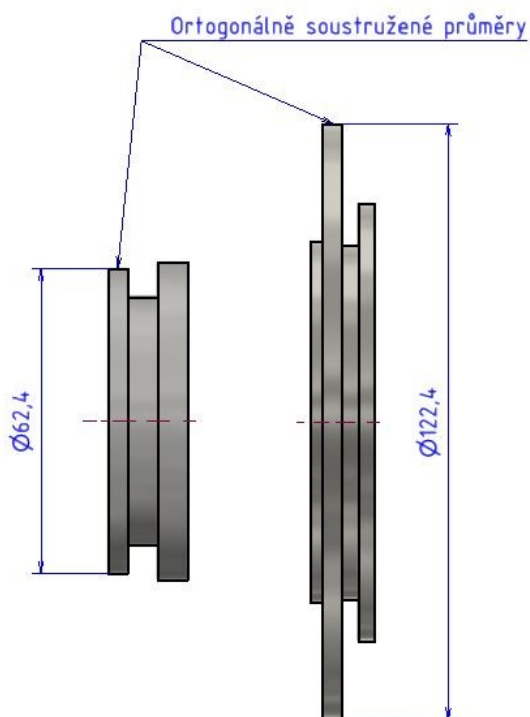


Obrázek 28, Tříska po obrábění oceli 12050



Obrázek 29, Tříška po obrábění Ti6Al4V

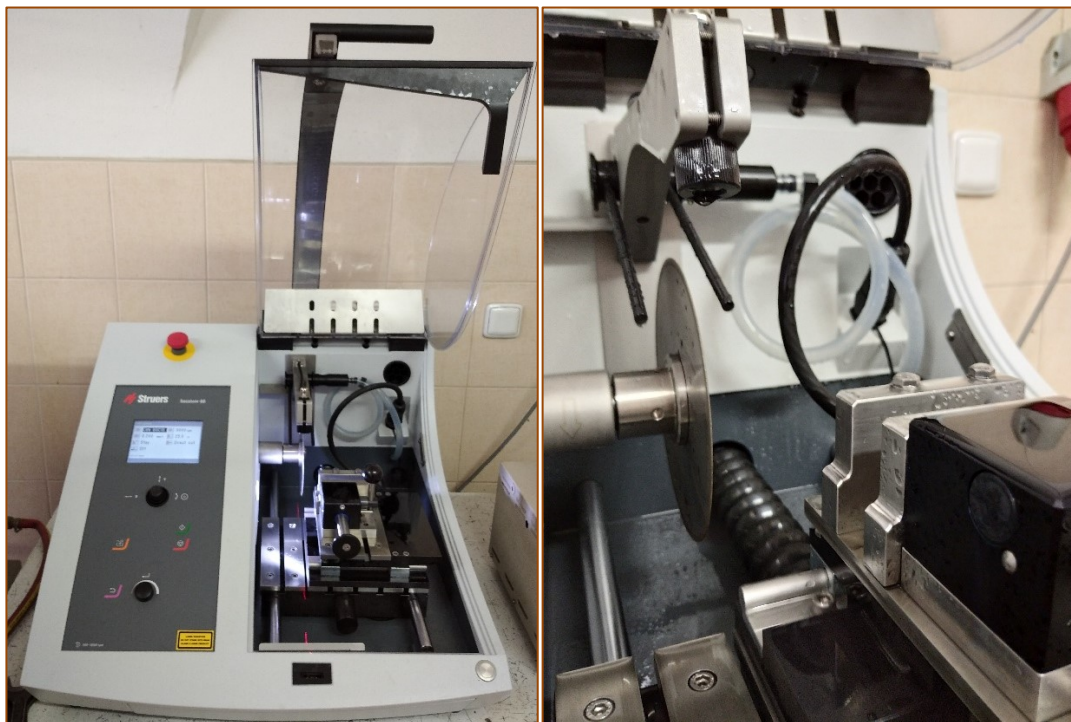
Při dokončení ortogonálního soustružení na požadovaný průměr byla oddělena část polotovaru na pásové pile. Pohled na oddělenou část obou polotovarů s označením ortogonálně soustruženého průměru je na obr. 30. Výkres obou těchto částí je součástí Přílohy 2.



Obrázek 30, Oddělené části na pásové pile

vpravo ocel 12050, vlevo Ti6Al4V

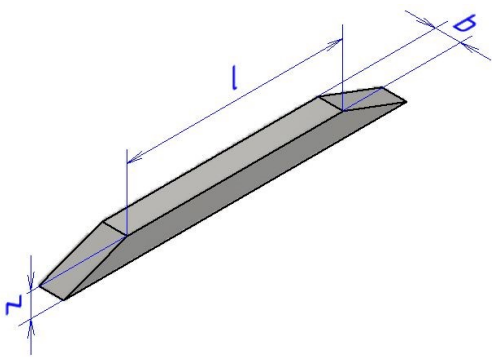
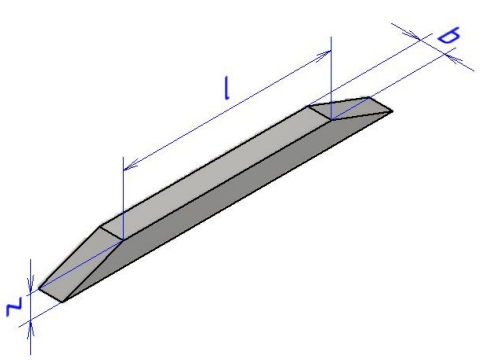
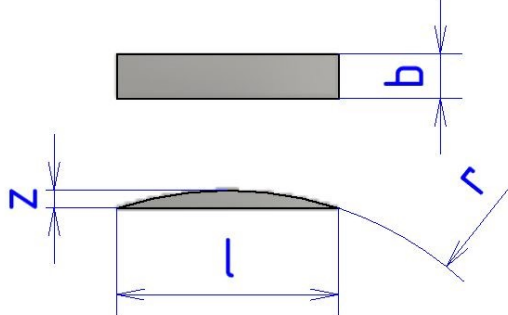
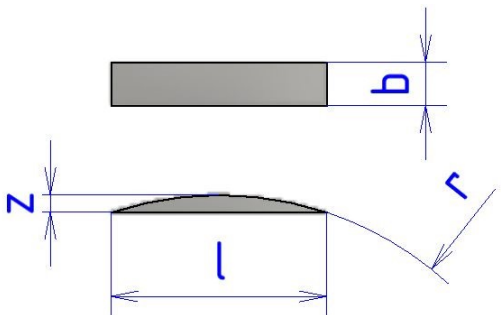
Po zpevnění povrchu obráběcím procesem následovala příprava měřících ploch pro měření mikrotvrdosti, a to provedením řezu. Řez byl realizovaný na metalografické pile (obr. 31) pro minimální tepelné i deformační ovlivnění vzniklých ploch.



Obrázek 31, Metalografická pila Struers Secotom 60

Provedením řezu vznikly dvě plochy pro měření mikrotvrdosti na obou materiálech – na každém materiálu jedna plocha na základní části a jedna plocha na oddělené části. Plochám na základních částech materiálů byl na pásové pile ještě dodatečně redukován objem přilehlého základního materiálu, aby vzniklý vzorek splňoval rozměrové limity mikrotvrdoměru. Geometrická specifikace vzorků spolu s jejich nadále užívaným označením uvádí tab. 7. Strany jednoho vzorku budou rozlišeny písmeny A a B, které budou součástí značení. Psány budou za podtržítko (např. T1_A).

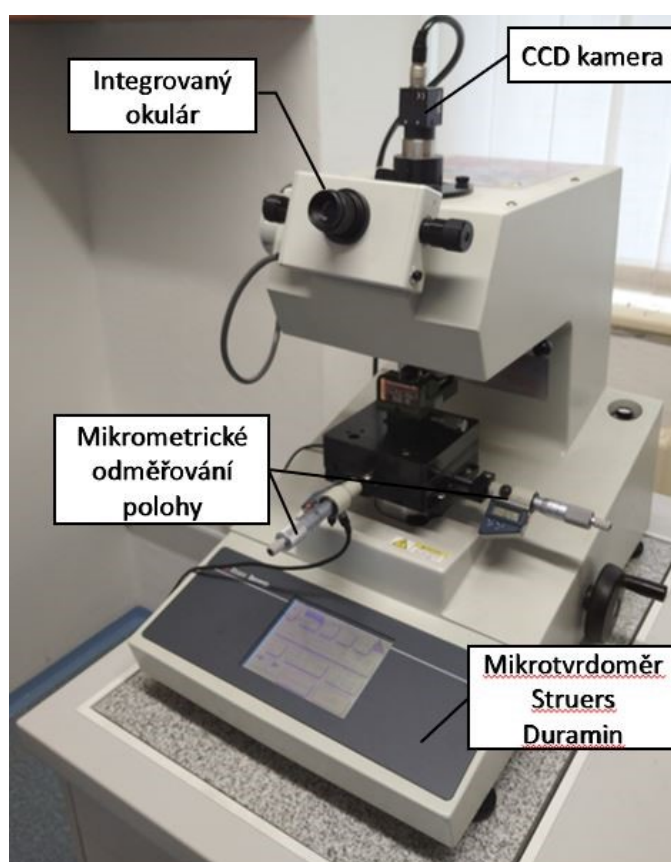
Tabulka 7, Značení a geometrická specifikací vytvořených vzorků

	Ti6Al4V		ocel 12050 (C45)	
Základní část				
	značení	T1	značení	C1
	poloha řezu od středu s [mm]	58,7	poloha řezu od středu s [mm]	29,1
	l (celková) [mm]	34,62	l (celková) [mm]	22,5
	z [mm]	3,8	z [mm]	2
	b [mm]	4	b [mm]	4
	poloměr povrchu r [mm]	61,2	poloměr povrchu r [mm]	31,2
Oddělená část				
	značení	T2	značení	C2
	poloha řezu od středu s [mm]	59,2	poloha řezu od středu s [mm]	29,6
	l (celková) [mm]	15,52	l (celková) [mm]	19,72
	z [mm]	2	z [mm]	1,6
	b [mm]	4	b [mm]	4
	poloměr povrchu r [mm]	61,2	poloměr povrchu r [mm]	31,2

6.4. Sestava pro měření průběhu zpevnění

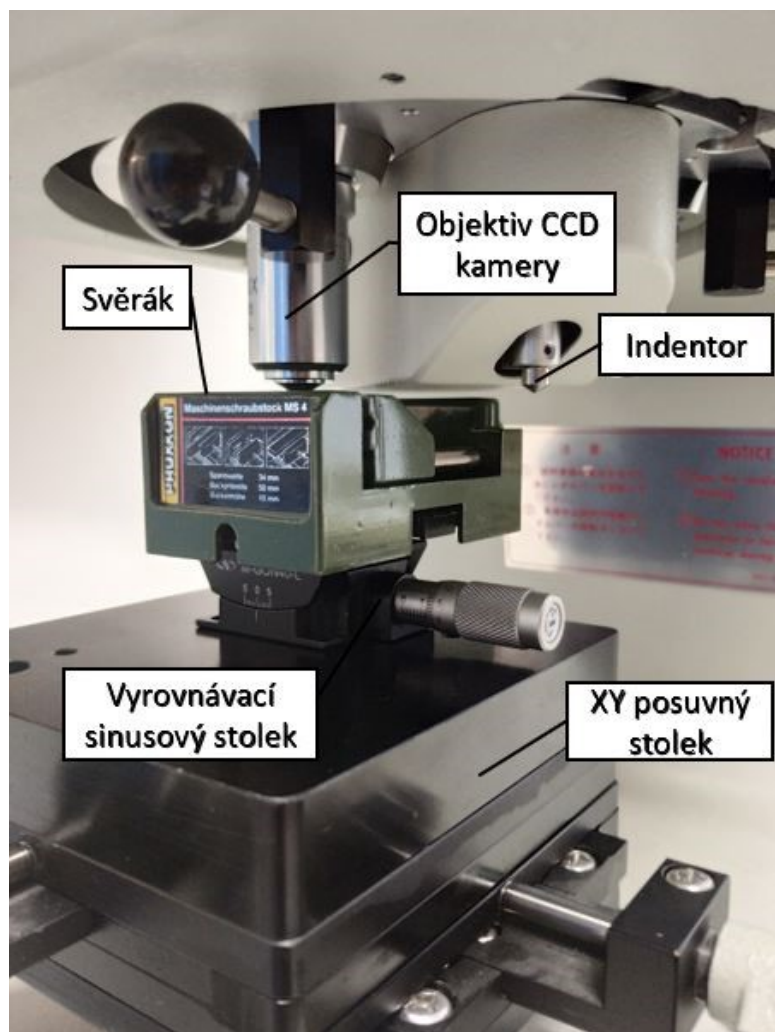
Základní prvek měřící sestavy tvořil mikrotvrdoměr Struers Duramin. Přístroj umožňuje měření tvrdosti dle Vickerse (v rozsahu mikro až makro) na kovových a nekovových materiálech. Manipulace s upnutým vzorkem je umožněna posuvným stolek polohovatelným v rovině XY pomocí dvojice mikrometrických šroubů. Pro měření úhlopříček vtisků je k dispozici integrovaný

okulár a CCD kamera. Obraz ze CCD kamery je možné sledovat na monitoru díky propojení mikrotvrdoměru s PC ve 40násobném zvětšení. Integrovaný okulár poskytuje 10násobné zvětšení. Součástí softwarové výbavy PC je program Hardtest, díky kterému je možné nastavit program měření tvrdosti, vyhodnocovat obraz ze CCD kamery, vypočítat tvrdost z naměřených úhlopříček vtisků a také ji konvertovat do jiných stupnic. Nejnižší kalibrované zatížení laboratorního přístroje odpovídalo tvrdosti HV 0,5. Toto zatížení není podle normy (tab. 3) zatížení odpovídající mikrotvrdosti, ale zatížení odpovídající měření tvrdosti dle Vickerse při nízkém zatížení. To však pro potřeby práce nebylo podstatné ani omezující.



Obrázek 32, Měřicí sestava

Pro vlastní upnutí a vyrovnaní vzorku na posuvném stolku mikrotvrdoměru, byl použit sinusový vyrovnávací stolek, na který byl připevněn svěrák. Vyrovnávacím stolkem bylo možné vzorek polohovat tak, aby při provádění vtisku byla osa indentoru kolmá na jeho povrch. Svěrákem byl vzorek upnut.



Obrázek 33, Popis měřící sestavy

6.5. Měření průběhu zpevnění

Popis měření bude sledovat chronologii jeho průběhu. Nejprve bude popsáno upnutí a vyrovnání vzorku. Následně bude popsána strategie měření, dle které bude měření provedeno. V poslední řadě budou získaná data vyhodnocena.

6.5.1. Upnutí a vyrovnání

Po upnutí vzorku do svěráku bylo třeba srovnat plochu pro měření tvrdosti tak, aby byla kolmá k ose indentoru. Vyrovnání bylo provedeno pomocí sinusového naklápěcího stolku. Kontrolou dobrého srovnání bylo zaostření CCD kamery na hranu vzorku a následný přejezd po délce plochy pro měření. V momentě, kdy po dráze nedošlo k významné ztrátě ostrosti obrazu, byla plocha vhodně vyrovnána.

6.5.2. Strategie měření

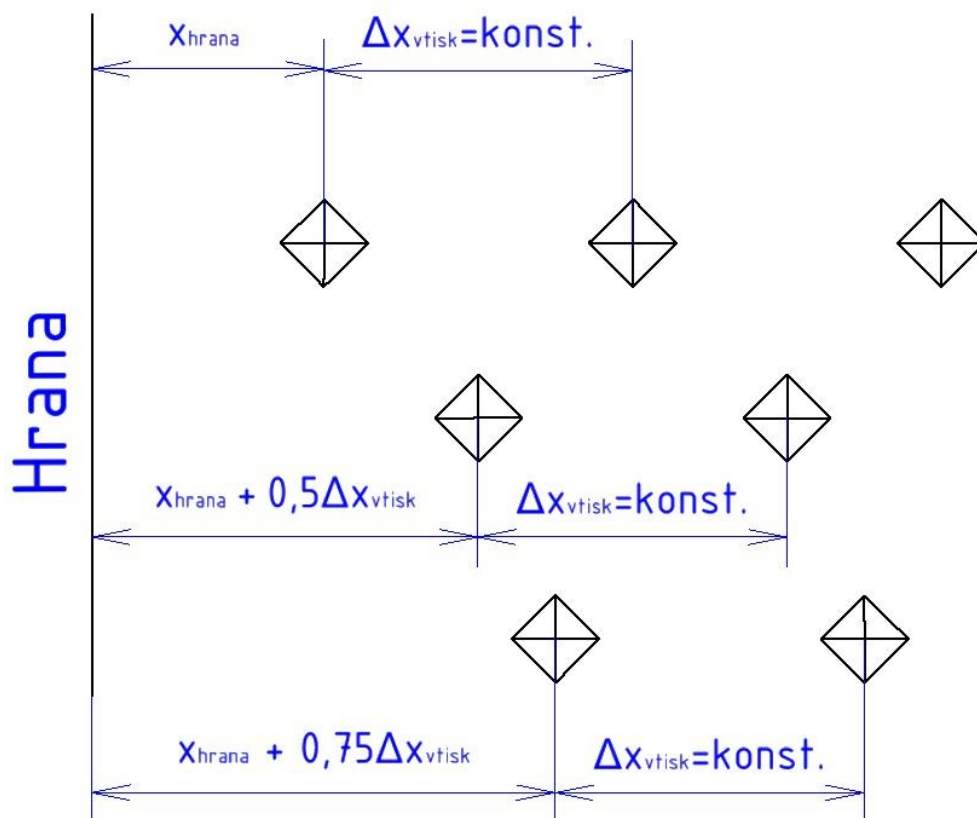
Na vyrovnané ploše již mohl být vytvořen kontrolní vtisk pro definování minimální vzdálenosti dvou sousedních vtisků a minimální vzdálenosti prvního vtisku od hrany. Takový vtisk byl proveden v půlce plochy pro měření, tedy v hloubce, která jistě nebyla ovlivněna ortogonálním soustružením. Ovládaní mikrotvrdoměru a podrobný návod na vytváření, měření a zaznamenávání vtisků a jejich úhlopříček je popsáno v rámci pracovního návodu, který je součástí Přílohy 3.

Minimální vzdálenosti byly zvoleny dle příslušné normy a jsou shrnuty v tab. 8.

Tabulka 8, Minimální vzdálenosti

	střední hodnota kontrolního vtisku [mm]	Odpovídající HV 0,5	vzdálenost sousedních vtisků [mm]	vzdálenost vtisku od hrany [mm]
C1	0,06512	218	0,2	0,163
T1	0,054475	312	0,204	0,136

S vymezenými minimálními vzdálenostmi byla definována následovná strategie měření. Tvrdost bude měřena do hloubky h přibližně 0,3 mm (řádově obvyklá hloubka zpevnění) na vzorcích s označením T1, C1; a to z obou stran. Ze znalosti vzdálenosti vtisků dosáhne této hloubky přibližně pátý vtisk řady. Pomocí pěti bodů nelze dostatečně detailně popsat průběh zpevnění, a tak budou vytvořeny další dvě řady, které budou polohovány tak, aby poskytovaly informaci o tvrdosti na nových souřadnicích. Jejich vzájemná poloha je schematicky znázorněna na obr. 34.



Obrázek 34, Schéma vzájemné polohy řad tvořících jeden průběh

Takto vznikne průběh hodnot tvrdosti tvořený 15 hodnotami tvrdosti pro 15 různých souřadnic. Prostor pro statistické hodnocení měření bude zajištěn opakováním tohoto průběhu (tvořeného z 15 hodnot) minimálně třikrát.

Informace o tvrdosti na povrchu⁴ bude opatřena měřením na oddělených částech (vzorky T2 a C2), a to měřením přímo na zakřiveném povrchu s následnou aplikací korekčního faktoru pro měření na konvexních válcových plochách dle ČSN EN ISO 6507-1.

Chronologicky jako poslední budou měřeny hodnoty v blízkosti povrchu, které však nesplňují minimální podmínku vzdálenosti od hrany a od sousedního vtisku. Tyto data budou tedy spíše orientační, jelikož nelze vyloučit, že materiál v takovém místě vtisku nebude ovlivněn blízkou hranou a sousedním vtiskem. Vytvoření těchto vtisků jako chronologicky posledních je odůvodněno snahou měřit co nejbližší povrchu v rámci normy.

⁴ Tj. na souřadnici $h=0\text{ mm}$

6.5.3. Naměřené hodnoty

V Příloze 4 jsou k dispozici tabulky naměřených hodnot dle definované strategie měření. Rozměry každého vtisku budou měřeny integrovaným okulárem a pomocí CCD kamery v rozhraní programu Hardtest. Součástí této přílohy jsou rovněž tabulky obsahující zprůměrované hodnoty měření provedených ze stran A a B. Tato data budou sloužit pro vyjádření jednoho průběhu vypovídajícím o průběhu zpevnění materiálu. Kompletní obsah přílohy bude zdrojem pro grafické interpretace výsledků měření. Tabulky obsahují kromě naměřených hodnot rovněž dopočtené průměrné hodnoty, směrodatné odchylky a standardní chyby. Aplikovaný způsob výpočtu je obecně uveden v následujících řádcích (vztahy 29, 30, 31). Použité značení v následujících vztazích respektuje konvenci o označování střední hodnoty (\bar{x}), směrodatné odchylky (s), standardní chyby ($\sigma_{\bar{x}}$) a celkového počtu měření (n).

Průměrné (střední) hodnoty budou vypočteny dle vztahu:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n x_i \quad (29)$$

Směrodatné odchylky budou vypočteny dle vztahu:

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (30)$$

Standardní chyby budou vypočteny dle vztahu:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (31)$$

6.5.4. Vyhodnocení a analýza výsledků

Data budou prezentována a vyhodnocována dle následovného systému: pro každý materiál (Ti6Al4V a ocel 12050) bude nejprve graficky znázorněno měření na straně A a na straně B. V grafech jsou zakomponovány hodnoty ze třech různých typů měření:

- I. Měření průběhu tvrdosti dle normy (dodržena minimální vzdálenost od hrany, pro každou hodnotu alespoň dvě opakování)
- II. Měření tvrdosti na povrchu dle normy (měřeno na zakřiveném povrchu vzorků oddělené části)
- III. Měření tvrdosti v blízkosti povrchu (mimo normu, informativní charakter)

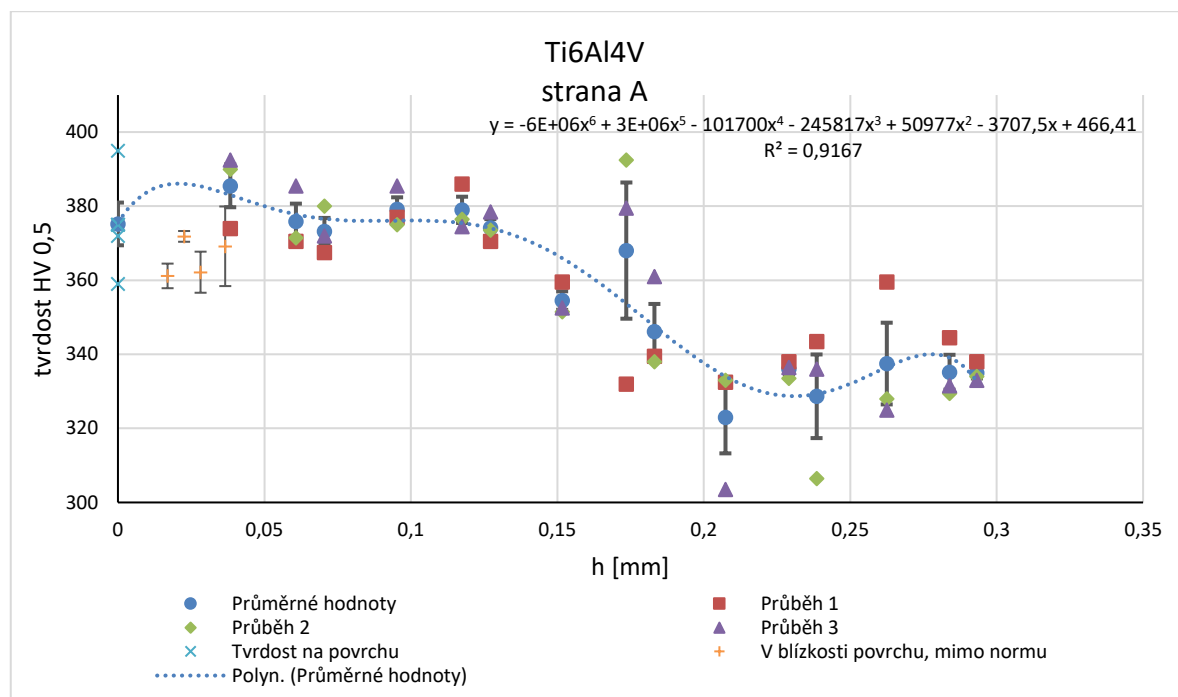
V těchto grafech budou znázorněny téměř všechny naměřené hodnoty. Pouze měření tvrdosti v blízkosti povrchu (měření III) bude znázorněno jednou, střední hodnotou. Průměrnými hodnotami získanými dle normy (měření I a měření II) bude proložen polynom 6. stupně, jelikož je na základě koeficientu determinace (R^2) nejvhodnějším regresním modelem. Separátně komentovány budou měření typu I, II a III.

Dále bude vytvořen graf pro komparaci hodnot získaných ze stran A a B. V tomto grafu budou figurovat již jen průměrné hodnoty. Polynom bude opět proložen jen těmi průměrnými hodnotami, které byly získány v mezích normy (měření I a měření II). Hlavním předmětem komentáře bude hodnocení podobnosti těchto průběhů.

Po zhodnocení symetričnosti měření z obou stran budou tyto dva průběhy zprůměrovány do jednoho jediného průměru. Tímto průběhem byl měla být popsána distribuce tvrdosti ve zkoušeném materiálu.

Posledním krokem vyhodnocení bude porovnání průběhů obou materiálů v jednom grafu. Do kontextu s tímto grafem pak budou v rámci komentáře uvedeny závěry z teoretické části práce týkajících se této problematiky.

Průběh zpevnění u vzorků z Ti6Al4V



Obrázek 35, Ti6Al4V – strana A

Měření I (měření průběhu tvrdosti dle normy)

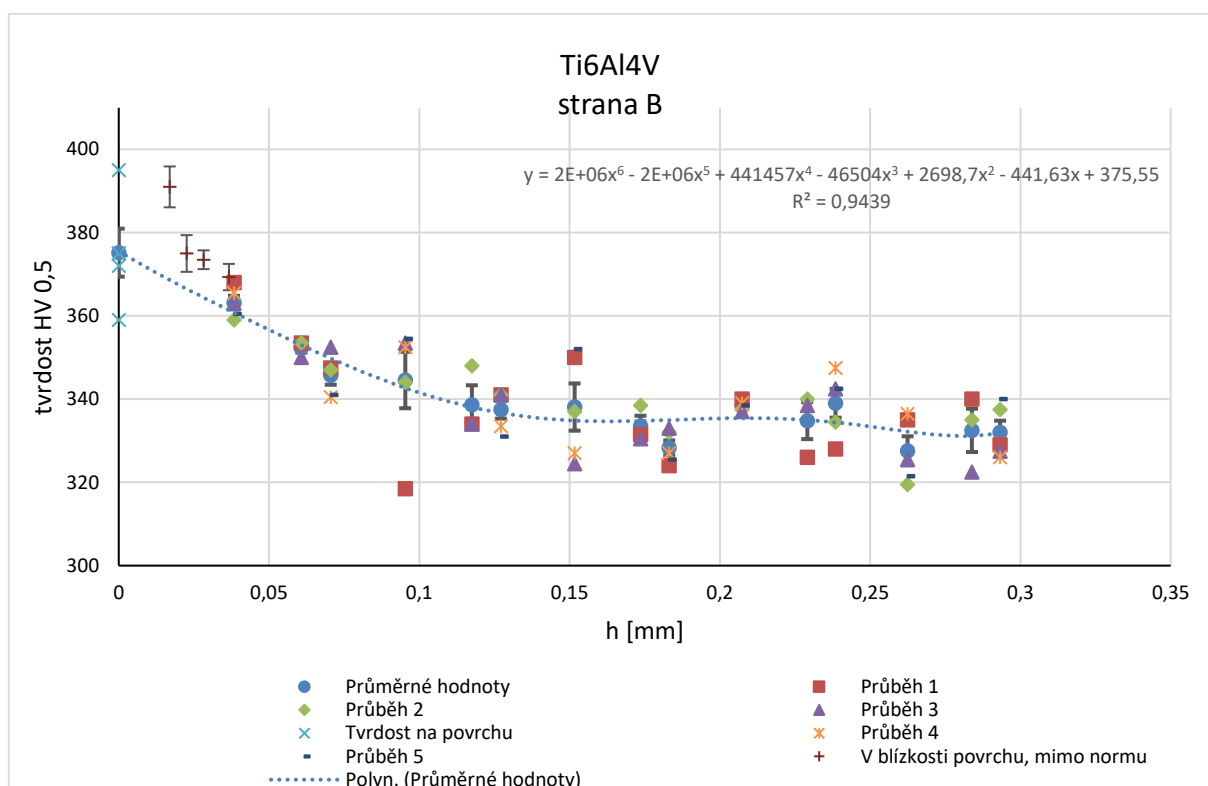
Měření I je reprezentováno řadami s názvem *Průběh 1*, *Průběh 2* a *Průběh 3*. Tyto průběhy jsou tvořeny z celkem 45 provedených vtisků na vzorku T1__A. Je zde patrný klesající trend v celém rozsahu hodnot. Tvrdost se ustálí na tvrdosti nezpevněného jádra přibližně v rozmezí hodnot hloubky $h = 0,2 - 0,25$ mm. Největší rozptyl naměřených hodnot (a také největší hodnota standardní chyby) je patrný v oblasti nejprudšího poklesu tvrdosti ($h = 0,15 - 0,2$ mm). U tohoto vzorku byla volena vzdálenost dvou řad větší než minimální.

Měření II (Měření tvrdosti na povrchu dle normy)

Na povrchu bylo provedeno 5 vtisků, jejichž hodnoty jsou zobrazeny v rámci řady s názvem *Tvrdost na povrchu*. Měření na zakřiveném povrchu (vzorek T2) je možné, pokud se odečtená hodnota tvrdosti koriguje korekčním faktorem, který je funkcí velikosti střední hodnoty úhlopříčky vtisku a poloměru zakřivení. Při měření na povrchu Ti6Al4V byl poměr velikosti vtisku ku zakřivení povrchu tak malý, že odpovídající korekční faktor, kterým se násobí odečtená hodnota tvrdosti, lze uvažovat jako rovný 1.

Měření III (Měření tvrdosti v blízkosti povrchu, mimo normu)

Měření III je reprezentováno v grafu řadou s názvem *V blízkosti povrchu, mimo normu*. Jak bylo zmíněno, tyto hodnoty jsou zatíženy chybou v podobě nedodržení potřebné vzdálenosti dvou vtisků a vzdálenosti vtisku od hrany. Skutečnost, že tyto hodnoty nesledují průběh proloženého polynomu nutně neznamená, že jejich hodnoty jsou zcela nesprávné, přinejmenším je ale nelze považovat za hodnoty stejně blízké správné hodnotě tvrdosti jako zbylé. Pro měření na vzorku T1__A byla využita celá použitelná šířka vzorku pro vytvoření řad pro měření I. Pokud by vzorek byl širší, bylo by zajímavé provést ve stejné hloubce vtisky tam, kde nenásleduje řada měření I.



Obrázek 36, Ti6Al4V – strana B

Měření I (měření průběhu tvrdosti dle normy)

Měření I je reprezentováno řadami s názvem *Průběh 1, Průběh 2 a Průběh 3, Průběh 4 a Průběh 5*. Tyto průběhy jsou tvořeny z celkem 65 provedených vtisků na vzorku T1__B, kde byla pro možnost největšího počtu hodnot volena nejmenší možná vzdálenost dvou sousedních řad. Vlivem komplikace při řezu na metalografické pile (uvolnění z upnutí a nutnost opakování řezu), však vznikl defekt na povrchu, který zmenšil použitelnou šířku vzorku. Z toho důvodu jsou některé souřadnice zmapovány 3 hodnotami tvrdosti a jiné 5 hodnotami tvrdosti.

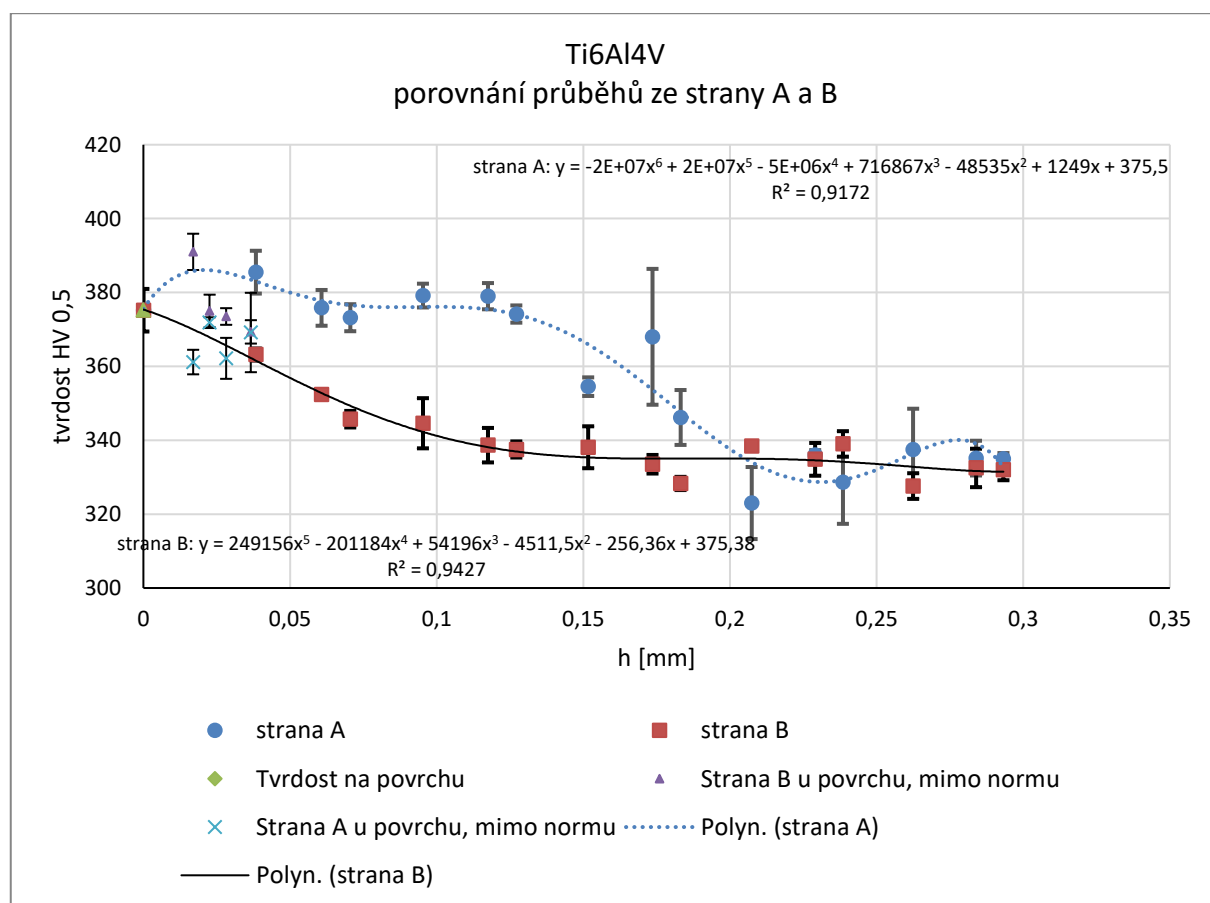
Patrný je zde opět klesající trend proloženého polynomu v celém rozsahu hodnot, a to až do ustálení tvrdosti na soustružením neovlivněné hloubce (cca 0,15 mm). Největší rozptyl naměřených hodnot (a také největší hodnota standardní chyby) je patrný těsně pod hloubkou 0,1 mm.

Měření II (Měření tvrdosti na povrchu dle normy)

Pro měření tvrdosti na povrchu byl použit vzorek T2. V grafu jsou zobrazeny shodné hodnoty jako v grafu předchozím a vztahuje se k nim stejný komentář.

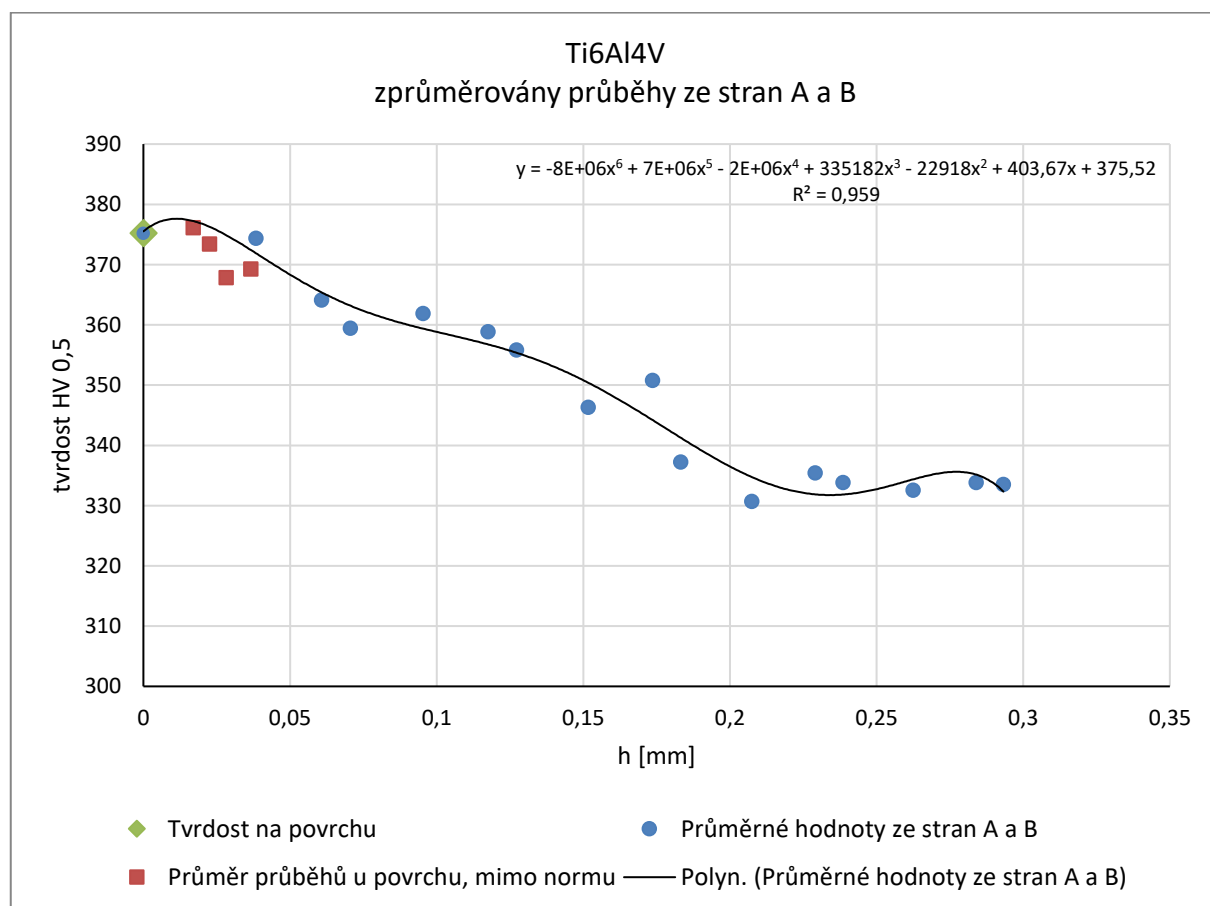
Měření III (Měření tvrdosti v blízkosti povrchu, mimo normu)

Měření III je reprezentováno v grafu řadou s názvem *V blízkosti povrchu, mimo normu*. Hodnoty v blízkosti povrchu naznačují, že by průběh z hodnoty povrchové tvrdosti vzápětí poměrně prudce rostl. O poslední hodnotě z měření III lze konstatovat, že je blízká (i souřadnicí h) první hodnotě tvrdosti z normou respektujícího měření I.



Obrázek 37, Ti6Al4V – porovnání průběhů ze strany A a B

Při porovnání průběhů ze strany A a ze strany B v jednom grafu je patrná určitá difference v průběhu. Průběh ze strany A jednoznačně indikuje větší hloubku zpevnění, jelikož hodnoty tvrdosti neovlivněného materiálu dosahuje ve větší hloubce h . Podstatné na tomto porovnání je skutečnost, že oba průběhy se potkávají na stejné hodnotě tvrdosti nezpevněného jádra. Přichází v úvahu spekulace nad nepřiměřeným ovlivněním plochy vneseným komplikací při řezání na metalografické pile. Řez bylo nutné provést nadvakrát, přičemž finální řez bylo třeba vést drážkou vytvořenou prvním řezem. Pokud by došlo k ovlivnění povrchu v blízkosti hrany (povrchu) mohla by se tato skutečnost promítnout v průběhu obdobně – tedy rozdílem pouze v určitém intervalu hloubky. Tato teorie nelze vyloučit ani potvrdit bez opakování měření na řádně vytvořeném vzorku.



Obrázek 38, Ti6Al4V – zprůměrovány průběhy ze stran A a B

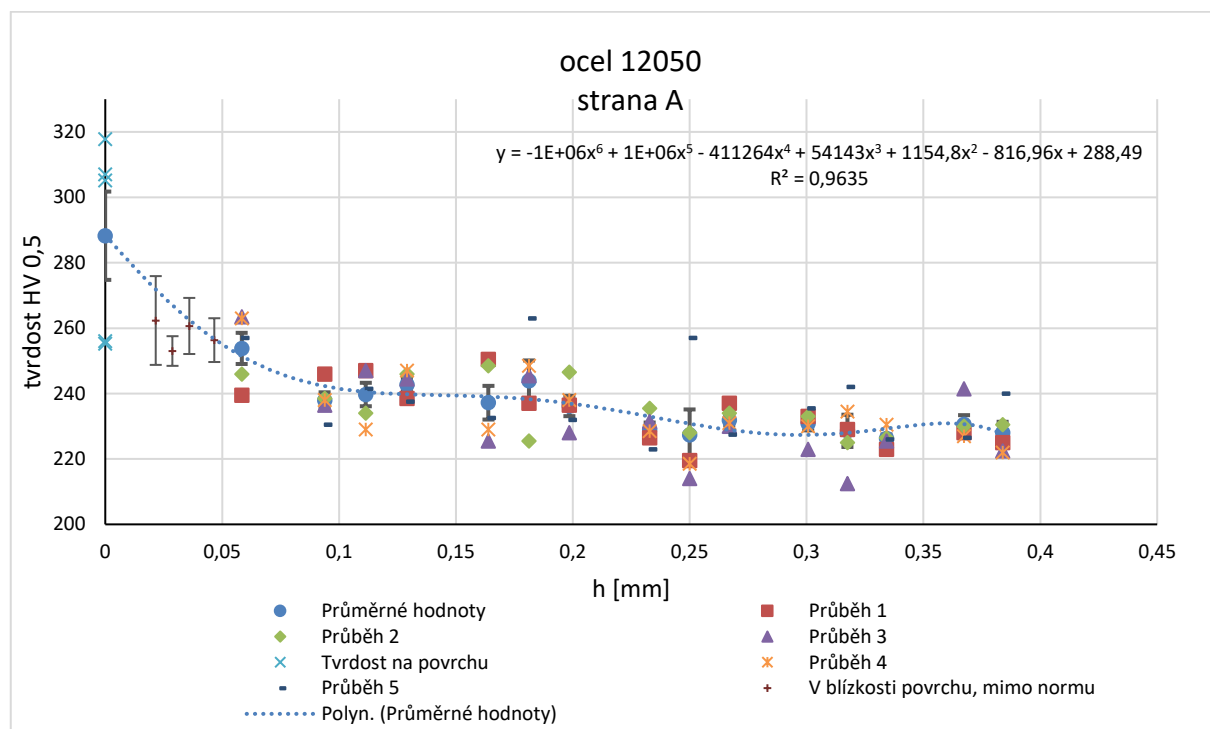
Vlivem rozdílnosti průběhů, u kterých bylo předpokládáno, že budou (symetričností plochy pro měření tvrdosti) velmi podobné, je jasné, že zprůměrováním těchto dvou průběhů do jednoho, budou jednotlivé hodnoty zatíženy značnou standardní chybou. Průběhem znázorněným v grafu je možné popsat průběh zpevnění na Ti6Al4V. Dle vztahů uvedených v teoretické části

(Hloubka a stupeň zpevnění) bude uvedena hloubka zpevněné vrstvy h_z a stupeň zpevnění.

$$K_z \doteq 13 [\%] \quad (32)$$

$$h_z \doteq 0,22 [mm] \quad (33)$$

Průběh zpevnění u vzorků z oceli 12050



Obrázek 39, ocel 12050 – strana A

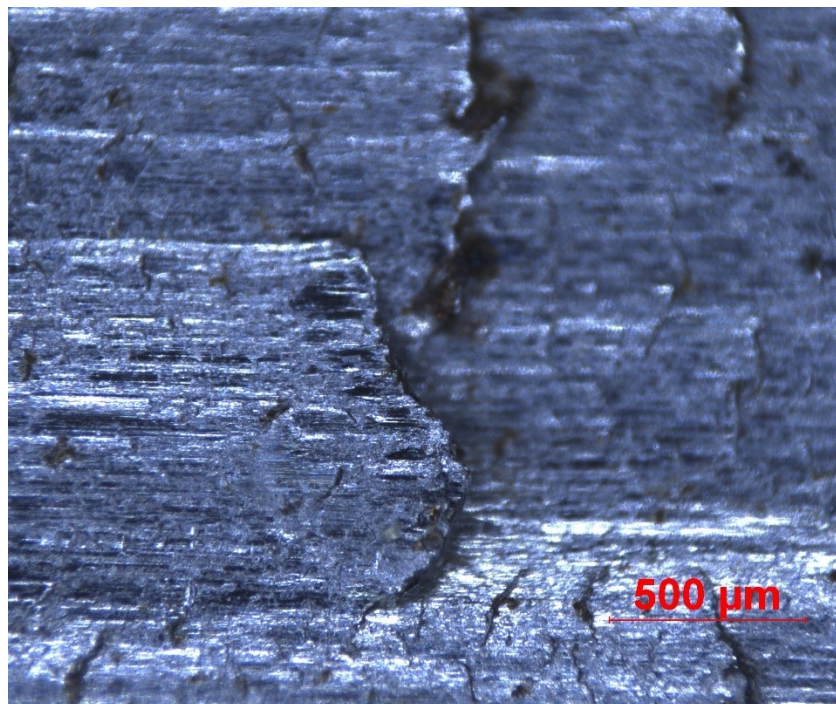
Měření I (měření průběhu tvrdosti dle normy)

Měření I je reprezentováno řadami s názvem *Průběh 1*, *Průběh 2* a *Průběh 3*, *Průběh 4* a *Průběh 5*. Tyto průběhy jsou tvořeny z celkem 75 provedených vtisků na ploše C1__A. Každé z 15 souřadnic hloubky h je přiřazeno 5 hodnot tvrdosti. Polynom je jako v předchozích případech proložen průměrnými hodnotami měření I a měření II. Je patrný celkový klesající trend proloženého polynomu, výjimku tvoří relativně konstantní hodnoty tvrdosti v rozmezí $h = 0,1 - 0,2$ mm. Následuje lehký pokles na hodnotu nezpevněné vrstvy, jejíž začátek lze lokalizovat do hloubky přibližně 0,25 mm pod povrchem.

Měření II (Měření tvrdosti na povrchu dle normy)

Pro naměřené hodnoty na povrchu (obdobně jako u vzorku T2) byl poměr střední hodnoty úhlopříčky vtisku ku poloměru křivosti povrchu velmi malý a byl

uvažován korekční faktor roven 1. Za povšimnutí stojí poměrně značná velikost povrchové tvrdosti a markantní rozptyl naměřených hodnot. Na optickém mikroskopu s CCD kamerou byly tedy pořízeny snímky povrchu pro nalezení eventuální souvislosti.

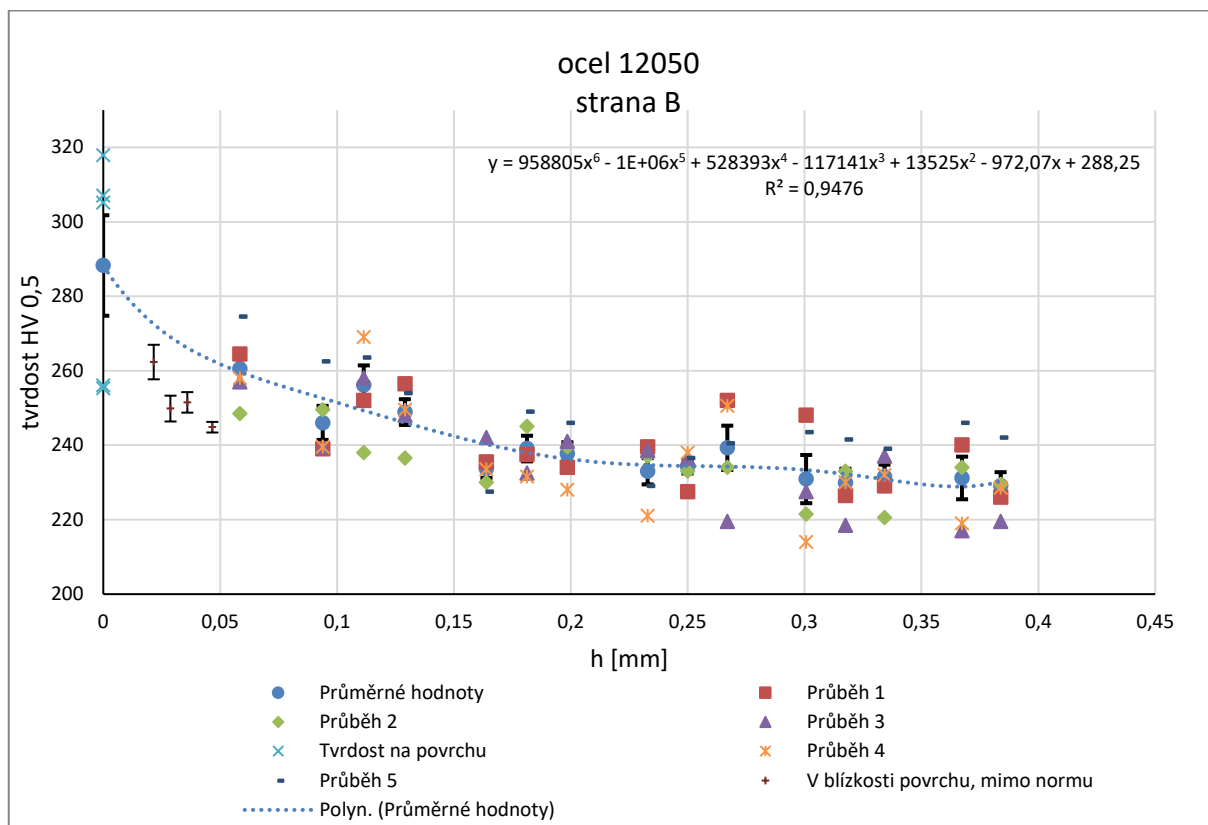


Obrázek 40, Obrobený povrch oceli 12050 (C45)

Z obr. 40 (provedený snímek) je patrný výskyt šupinkových útvarů na povrchu oceli 12050. Ze ztráty ostroty v okolí tohoto útvaru lze usoudit, že jsou šupinky v jiné výškové hladině než zbylý materiál. To by mohlo být příčinou obou atypických fenoménů (velká povrchová tvrdost a rozptyl měřených hodnot). Vlivem nesoudržnosti šupinky s okolním materiálem se může při provedení vtisku šupinka pružně deformovat, důsledkem čehož se vytvoří malý vtisk a naměří se velká tvrdost. Vzhledem k velikosti těchto šupinkovitých útvarů se rovněž pravděpodobně stalo, že část vpichů byla provedena na povrchu těchto šupinek a část mimo ně, což by osvětlovalo rozptyl hodnot.

II (Měření tvrdosti v blízkosti povrchu, mimo normu)

Měření III je reprezentováno v grafu řadou s názvem *V blízkosti povrchu, mimo normu*. Hodnoty získané v blízkosti povrchu relativně navazují na proložený polynom z měření I. Z porovnání standardních chyb měření III a měření I opět plyne závěr, že měření v blízkosti povrchu a provedené řady měření I je spíše orientační.



Obrázek 41, ocel 12050 – strana B

Měření I (měření průběhu tvrdosti dle normy)

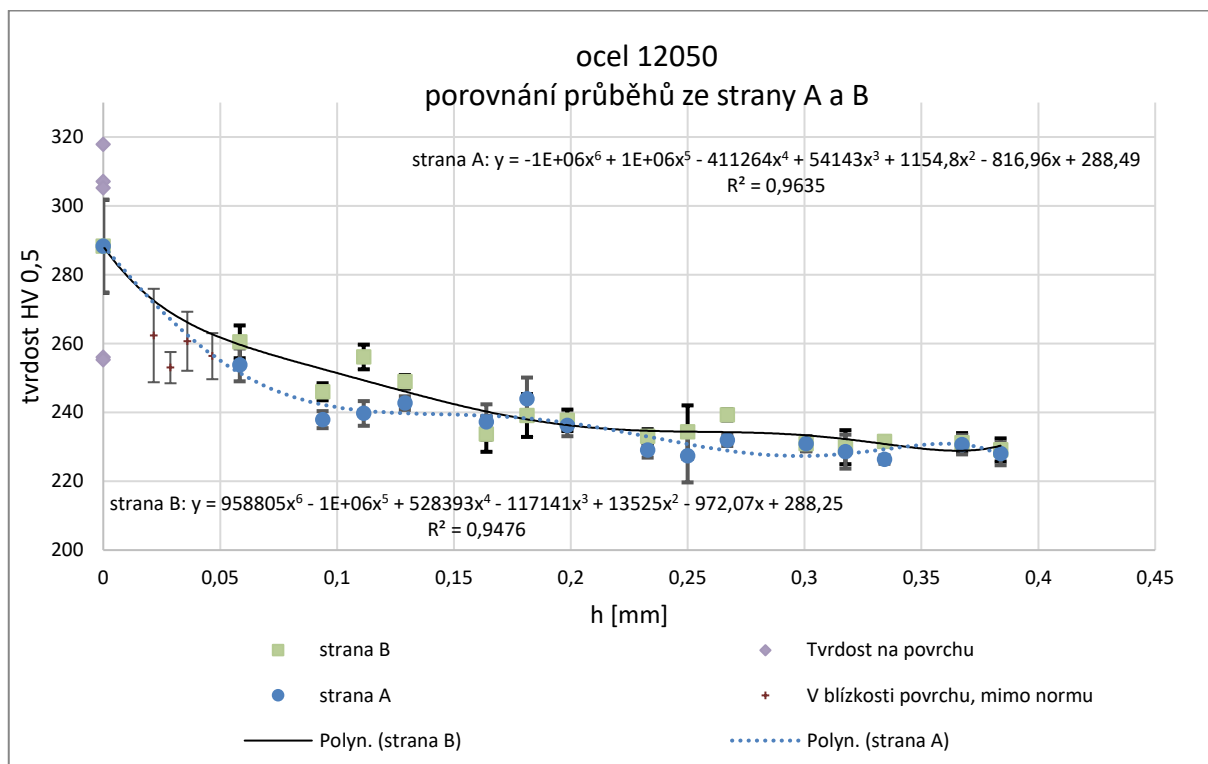
Měření I je reprezentováno řadami s názvem *Průběh 1*, *Průběh 2* a *Průběh 3*, *Průběh 4* a *Průběh 5*. Tyto průběhy jsou tvořeny z celkem 75 provedených vtisků na ploše C1_B. Každé z 15 souřadnic hloubky h je přiřazeno 5 hodnot tvrdosti. Polynom proložený průměrnými hodnotami měření I a měření II soustavně klesá na hodnotu nezpevněné vrstvy, které dosahuje na souřadnici cca $h = 0,25$ mm.

Měření II (Měření tvrdosti na povrchu dle normy)

Pro měření tvrdosti na povrchu byl použit vzorek C2. V grafu jsou zobrazeny shodné hodnoty jako v grafu předchozím a vztahuje se k nim stejný komentář.

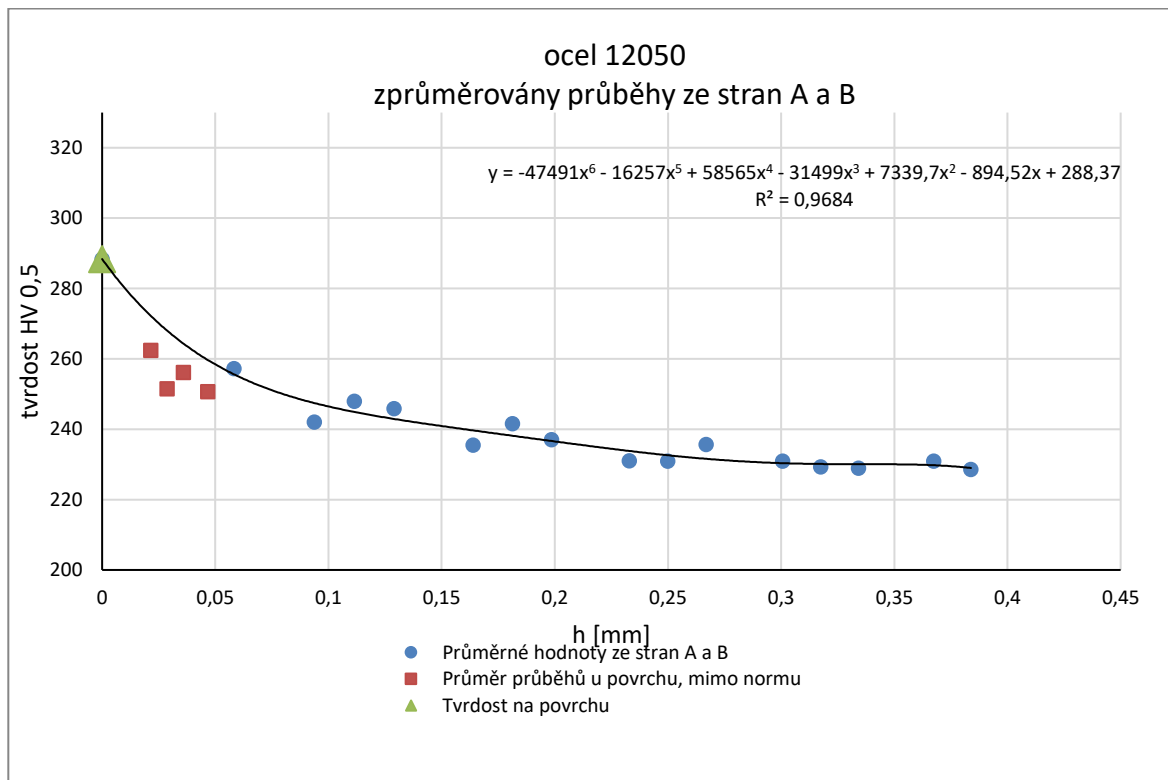
Měření III (Měření tvrdosti v blízkosti povrchu, mimo normu)

Měření III je reprezentováno v grafu řadou s názvem *V blízkosti povrchu, mimo normu*. Hodnoty získané v těsné blízkosti povrchu značí (v případě jejich uvažování) prudký pokles tvrdosti a následný relativně prudký nárůst k hodnotám z měření I.



Obrázek 42, ocel 12050 - porovnání průběhů ze stran A a B

Z komparace průběhů tvrdosti získaných na plochách vzorků C1__A a C1__B vyplývá velmi dobrá shoda. Polynomy sledují podobný klesající trend, v relativně podobné hloubce přechází v tvrdost nezpevněné vrstvy. Průběh strany A vykazuje mírně prudší pokles tvrdosti v rozmezí $h = 0 - 0,1$ mm. Tato shoda potvrzuje, že je možné na jednom vzorku naměřit ze dvou stran sobě blízké průběhy. Takové průběhy je vhodné zprůměrovat do jednoho, který lze považovat za průběh vypovídající o distribuci tvrdosti zkoumaného dílce.



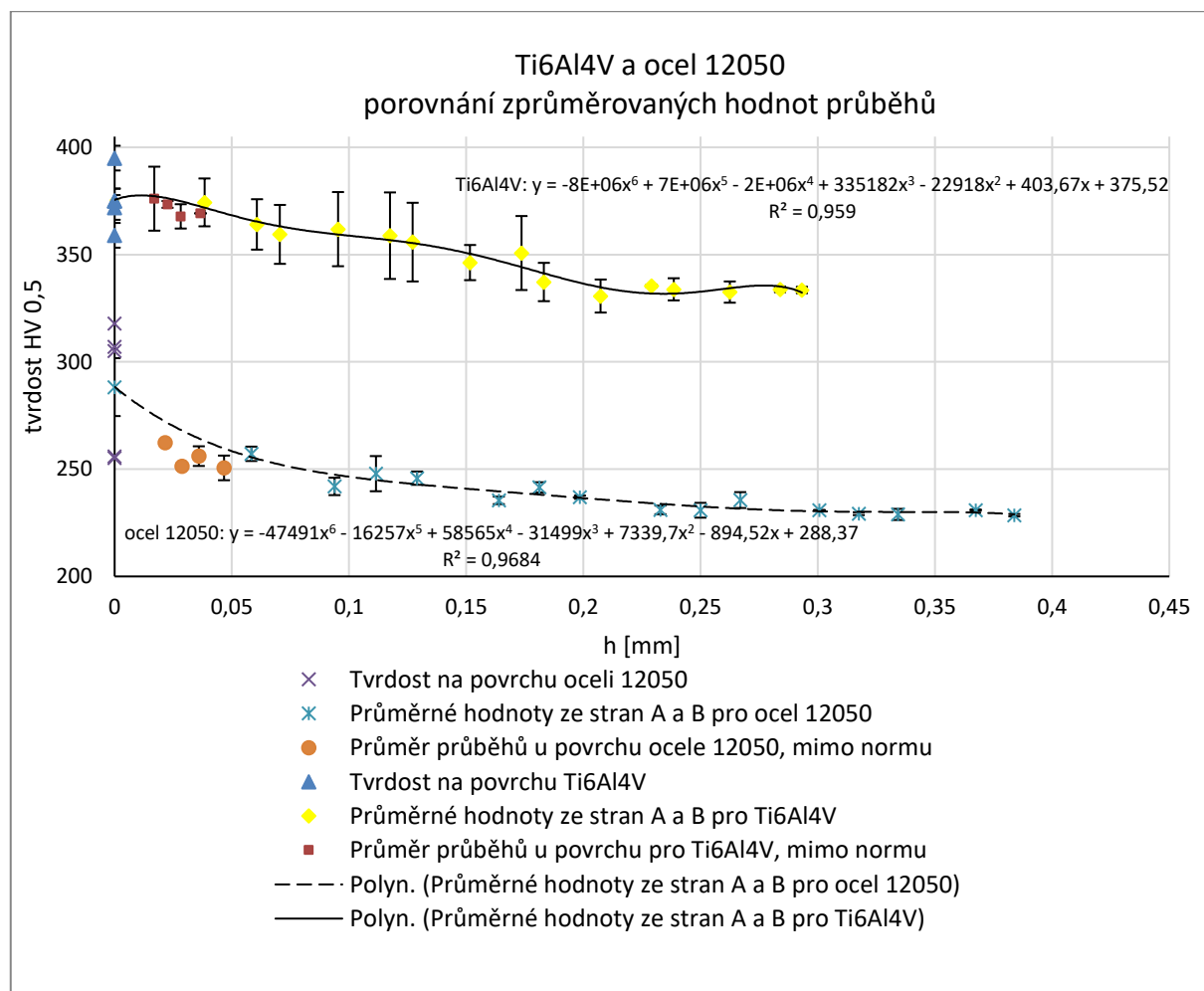
Obrázek 43, ocel 12050 – zprůměrovány průběhy ze stran A a B

Jak již bylo očekávané z porovnání průběhů ze strany A a B, výsledný průběh se skládá z hodnot zatížených v porovnání se vzorkem T1 výrazně menší standardní chybou. Lze opět hodnotit hloubku a stupeň zpevnění:

$$K_z \doteq 25 [\%] \quad (34)$$

$$h_z \doteq 0,24 [mm] \quad (35)$$

Porovnání průběhů zpevnění u vzorků z oceli 12050 a Ti6Al4V



Obrázek 44, Ti6Al4V a ocel 12050 – porovnání zprůměrovaných hodnot průběhů

Výsledkem porovnání je skutečnost, že na oceli 12050 bylo dosaženo větší hloubky zpevnění než na Ti6Al4V (ocel 12050 - $h_z=0,24$ mm; Ti6Al4V - $0,22$ mm). U vzorku ze slitiny titanu byl odečten téměř poloviční stupně zpevnění (ocel 12050 - $K_z = 25\%$; Ti6Al4V - $K_z = 13\%$). Tento výsledek se může jevit překvapující a v rozporu s teorií o míře zpevnění.

S odkazem na teoretickou část práce (kapitola Oblasti plastické deformace) lze konstatovat, že dominantními vlivy ovlivňujícími míru zpevnění materiálu jsou:

- řezné podmínky
- geometrie břitu
- vlastnosti obráběného materiálu

Řezné podmínky byly při ortogonálním soustružení obou materiálů identické, stejně tak se neměnila geometrie bříty. Zbývá tedy vlastnost obráběného materiálu jako jediný proměnný faktor mající významný vliv na míru zpevnění.

Z porovnání mechanických vlastností obou materiálů (tab. 5) vyplývá, že Ti6Al4V je houževnatější a měl by vykazovat zpevnění větší. Tato teze by se dala rovněž podepřít porovnáním záznamů tahových zkoušek obou materiálů – materiál s větší plochou pod křivkou záznamu tahové zkoušky lze považovat za houževnatější.

Vysvětlením stupně zpevnění je s největší pravděpodobností špatná kvalita povrchu oceli 12050 po ortogonálním soustružení pro měření povrchové tvrdosti. Jak bylo již komentováno v průběhu měření, výskyt šupinkových útvarů na povrchu téměř jistě významně ovlivnil výsledky měření. Pro určení hodnoty stupně zpevnění je zásadní právě povrchová tvrdost. Pakliže šupinkovité útvary zapříčinily svým odpružením při provádění vtisku naměření větší hodnoty povrchové tvrdosti, je zřejmé, že došlo i k zvětšení hodnoty stupně zpevnění K_z .

V rozporu s teorií je i hodnota hloubky zpevnění, která je v řádech setin milimetrů větší u oceli. Hloubka zpevnění byla odečítána ze zprůměrovaného průběhu stran A a B, které byly u titanu relativně rozdílné. Je možné, že menší odečtená hodnota hloubky zpevnění Ti6Al4V je způsobená tímto rozdílem. Tato interpretace nelze potvrdit ani vyvrátit bez opakování měření na ideálně připraveném vzorku titanu.

7. Shrnutí experimentální části

Budou vyhodnoceny styčné body praktické části respektující chronologii jejího průběhu. Nejprve bude zhodnocena vlastní příprava vzorků, následně měřicí sestava a v poslední řadě vlastní metodika měření.

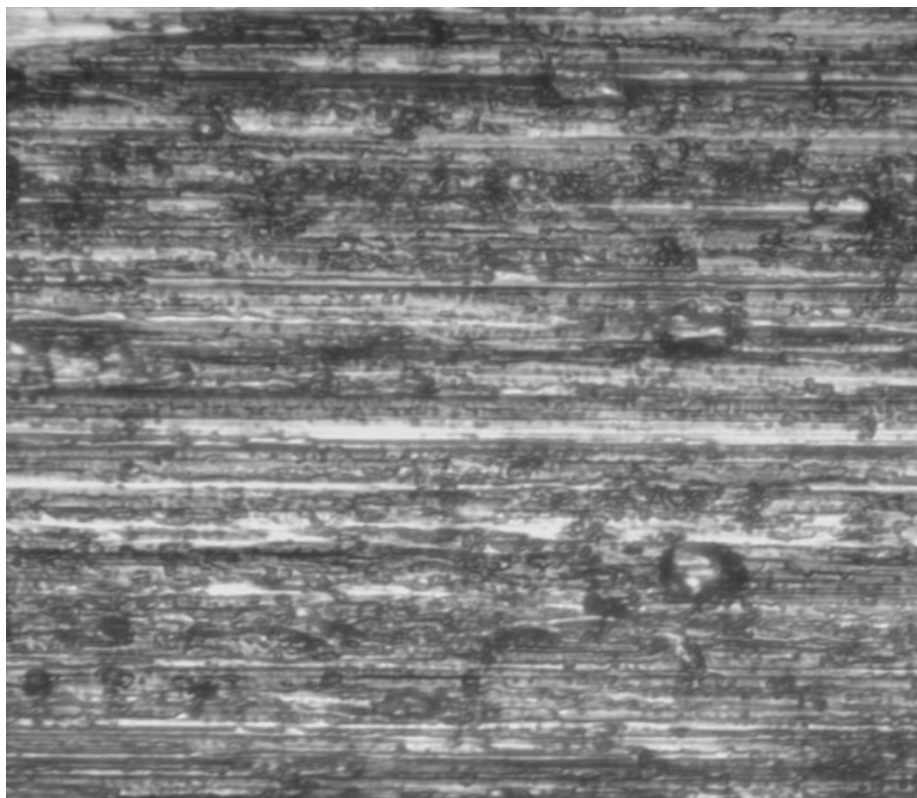
Vlastní výrobě vzorků předchází určení jejich geometrických parametrů – volí se šířka válce a poloha řezu. Šířka upíchnutého válce byla v případě provedeného měření cca 4 mm, což byla pro měření dostačující hodnota. Pokud by však byla šířka větší, bylo by možné měřit tvrdost v blízkosti povrchu mimo normu (měření III) v místě, kde nenavazuje ihned řada standardního měření. Jinými slovy by byla získána hodnota tvrdosti u povrchu ovlivněná pouze blízkostí hrany a mohlo by dojít k posunu výsledků blíže správným hodnotám. Hypoteticky lze také uvažovat situaci, při které by došlo ke zpevnění v axiálním směru při upichování zkušebního válce. Důsledkem toho by byla proměnná tvrdost po šířce plochy pro měření tvrdosti. Eventuálním projevem této skutečnosti by mohla odlišnost průběhů získaných na straně A a B. Z těchto důvodů je v rámci možností (přípravku na upnutí vzorku, rozměru zkoumaného tělesa) vhodnější volit šířku větší. Pozornost a pečlivost by měla být věnována také vlastnímu provedení dělicí operace, aby vzniklá čela separovaného válce byla vzájemně rovnoběžná a kolmá k ose.

Poloha řezu definuje maximální dosažitelnou hloubku h na ploše pro měření tvrdosti. Při obvykle malých hloubkách zpevnění by byly přirozeně navrhovány velmi malé oddělené části.⁵ Takto požadované provedení řezu je obtížně realizovatelné. Hrozí rozkmitání kotouče v řezu a získání vlnitého povrchu, což je pro měření tvrdosti nevhodné. Při volbě polohy řezu tedy není na škodu volit hodnotu polohy řezu spíše blíže ke středu - přirozeně s ohledem na možnosti metalografické pily. Pokud je na upíchnutém válci prostor pro více řezů, je praktické jich provést více a v různých polohách.

Měřicí sestava je v podobě, ve které byla popsána v kapitole Sestava pro měření průběhu zpevnění, funkční. Zajímavé je porovnat měření jednoho vtisku pomocí integrovaného okuláru a pomocí CCD kamery. Větší rozdílnost těchto měření byla pozorována u Ti6Al4V. Naopak u oceli se zdá, že bylo měření

⁵ Řez by byl polohován co nejdále od středu S.

mnohem preciznější a hodnoty byly sobě mnohem bližší. Důvodem je přívětivější struktura povrchu pro odečítání úhlopříček vtisků. Na obr. 45 a obr. 46 je pro porovnání pohled na povrchy obou materiálů. Preciznost měření je tedy dána také stavem povrchu. Na površích, na kterých lze dobře odečítat úhlopříčky vtisků, není nutné v rámci úspory času přeměřovat vtisky na integrovaném okuláru.



Obrázek 45, Povrch T1 – zvětšení x40



Obrázek 46, Povrch C1 – zvětšení x40

Z hlediska vlastního provedení měření považuji za důležité doporučit minimální časovou prodlevu mezi provedením řezu a vlastním měřením na vytvořené ploše. S časem dochází k degradaci povrchu a vzniku oxidů, které mohou zkreslovat hodnoty tvrdosti a také významně komplikovat odečet velikosti vtisků. Při určování stupně zpevnění pak doporučuji sledovat zakřivený povrch pro případnou identifikaci možných zdrojů nepřesnosti při určování stupně zpevnění.

Na základě sumarizace dosažených výsledků konstatuji, že navržená metodika je funkční a použitelná. Byly pojmenovány komplikace spojené s její aplikací a navrhnuty doporučení pro jejich eliminaci. Je zde prostor pro další ověření této metodiky, například ověření podobnosti průběhů tvrdosti na ploše základní a oddělené části jednoho materiálu. Nabízí se také řada vylepšení samotného způsobu měření, například vedení řady vtisků pod úhlem vůči hraně plochy pro měření. Tím by bylo umožněno získat v rámci jedné řady ještě více hodnot tvrdosti do určité hloubky. Bylo by však třeba provést úpravy v měřicí sestavě a doplnit ji o přípravek umožňující úhlové pozicování vzorku.

8. Závěr

V teoretické části práce byl v potřebném rozsahu popsán vznik obrobeného povrchu za použití nejzákladnějších principů a termínů zavedených v kapitole Obrábění. Ve vztahu k obrobenému povrchu byly také v teoretické rovině popsány oblasti plastické deformace a faktory, které nejvýznamněji tyto oblasti ovlivňují. Na takto vytvořený tematický celek navazovala část práce věnující se hodnocení obrobeného povrchu. Byl zaveden klíčový pojem integrita povrchu. Jednotlivé složky integrity povrchu byly v základním rozsahu popsány a vyjmenovány základní metody jejich měření. Detailněji byla rozebrána mikrotvrдость, jakožto užívaný nástroj pro popis průběhu zpevnění povrchové vrstvy. Shrnuty byly také aplikované metody přípravy měřících ploch pro měření mikrotvrđosti pod povrchem. V kontextu byly jmenovány úskalí těchto metod, čímž byla zformulována motivace pro vytvoření metodiky nové. Ta byla teoreticky navržena.

Pro možnost experimentální verifikace navržené metodiky, byl vytvořen pracovní postup pro práci s mikrotvrđoměrem umístěný v laboratořích Fakulty strojní ČVUT v Praze. Dle navržené metodiky byly vytvořeny vzorky a na mikrotvrđoměru naměřeny průběhy zpevnění. Metodika byla ověřena a označena za použitelnou. Byly pojmenovány možnosti pro zlepšení a další ověření.

Vytyčené cíle práce byly splněny. Závěrem si dovoluji podtrhnout fakt, že samotný průběh zpevnění nemůže komplexně vypovídat o integritě obrobeného povrchu. Je však její důležitou součástí a pro správné poznání stavu povrchu je patřičné uvažovat informaci o průběhu tvrdosti v relaci s ostatními faktory integrity povrchu.

Seznam použité literatury

- [1] MÁDL, J. a J. BARCAL. *Základy technologie II*. Vyd. 2. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2007. ISBN 978-80-01-03733-1.
- [2] HUMÁR, A. *Technologie obrábění - 1. část: Studijní opory pro magisterskou formu studia* [online]. Brno, 2003 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/obrabeni/opory-save/TI_TO-1cast.pdf
- [3] HAMERNÍK, J. Základy obrábění. In: *Mgr. Jan Hamerník* [online]. 2005 [cit. 2020-03-22]. Dostupné z: <http://jhamernik.sweb.cz/obrabeni.htm>
- [4] MÁDL, J. *Teorie obrábění*. 1. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1990.
- [5] MACEK, K. a P. ZUNA. *Nauka o materiálu*. Praha: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 80-010-1507-6.
- [6] PŘIKRYL, Z. a R. MUSÍLKOVÁ. *Teorie obrábění: učebnice pro vysoké školy*. 3., opr. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1975.
- [7] ARUNACHALAM, R.M.; MANNAN, M.A. a SPOWAGE, A.C. Surface integrity when machining age hardened Inconel 718 with coated carbide cutting tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2004, **44**(14), 1481-1491 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.05.005. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695504001270>
- [8] MÁDL, J. *Jakost obráběných povrchů*. Ústí nad Labem: Univerzita J.E. Purkyně v Ústí nad Labem, ÚTRV, 2003. ISBN 80-704-4539-4.
- [9] GAVALDA DIAZ, O.; GARCIA LUNA, G.; LIAO, Z. a AXINTE, D. The new challenges of machining Ceramic Matrix Composites (CMCs): Review of surface integrity. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. 2019, **139**, 24-36 [cit. 2020-03-09]. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2019.01.003. ISSN 08906955. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0890695518306084>
- [10] JURENA, P. *Snímání a hodnocení jakosti broušeného povrchu kontaktním a bezkontaktním způsobem*. Zlín, 2011.. Diplomová práce. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Vedoucí práce Vladimír Pata.
- [11] ŠTEFAN, V. *Filtrace dat při měření drsnosti povrchu*. Plzeň, 2014.. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Z. Pospěch.

- [12] HALUZÍKOVÁ, B. *Měření a analýza topografie povrchů plastových produktů ve vztahu k technologii výroby*. Ostrava, 2010.. Diplomová práce. Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Jan Valíček.
- [13] Ettl, P.; Schmidt B.; Schenk M.; Laszlo I.; Haeusler G., Rastogi P. a Gyimesi F. Roughness parameters and surface deformation measured by coherence radar. *SPIE - The International Society for Optical Engineering* [online]. 1998, , 133-140 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1117/12.323304. Dostupné z: <http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=953298>
- [14] Měření drsnosti. *M&B Calibr* [online]. [cit. 2020-03-20]. Dostupné z: <https://www.mbcaltbr.cz/mereni-drsnosti.html>
- [15] Rabiey, M.; Walter, Ch.; Kuster, F.; Stirnemann, J.; Pude, F. a Wegener, K. Dressing of Hybrid Bond CBN Wheels Using Short-Pulse Fiber Laser. *Strojnický věstník – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2012, **58**(7-8), 462-469 [cit. 2020-03-20]. DOI: 10.5545/sv-jme.2011.166. ISSN 00392480. Dostupné z: <http://www.sv-jme.eu/article/dressing-of-hybrid-bond-cbn-wheels-using-short-pulse-fiber-laser/>
- [16] Deveci, M. Types of residual stresses. In: *Stresstech* [online]. 2018 [cit. 2020-03-15]. Dostupné z: <https://www.stresstech.com/en/knowledge/articles/stresstech-bulletin-13-types-residual-stresses/>
- [17] X-RAY DIFFRACTION. In: *Stresstech* [online]. [cit. 2020-03-16].
- [18] Mádl, J. *Experimentální metody v teorii obrábění*. 4. přeprac. vyd. Praha: Ediční středisko ČVUT, 1988.
- [19] Doubrava, K. Principy odvrtávací metody. *Bulletin of applied mechanics*. 2007, **3**(11), 74-81. ISSN 1805-9422. Dostupné z: <http://www.bulletin-am.cz/index.php?journal=vam&page=search&op=search>
- [20] An, Q.; Wang Ch.; Xu J.; Liu P. a Chen M. Experimental investigation on hard milling of high strength steel using PVD-AlTiN coated cemented carbide tool. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* [online]. 2014, **43**, 94-101 [cit. 2020-07-16]. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2013.11.007. ISSN 02634368. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0263436813002400>
- [21] Vojtěch, D. *Kovové materiály*. Praha: Vydavatelství VŠCHT, 2006. ISBN 80-708-0600-1.

- [22] ZHANG, C.; LI, F. a WANG, B. Estimation of the elasto-plastic properties of metallic materials from micro-hardness measurements. *Journal of Materials Science* [online]. 2013, **48**(12), 4446-4451 [cit. 2020-07-20]. DOI: 10.1007/s10853-013-7263-3. ISSN 0022-2461. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s10853-013-7263-3>
- [23] ČSN EN ISO 14577-1. *Kovové materiály - Instrumentovaná vnikací zkouška stanovení tvrdosti a materiálových parametrů - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016.
- [24] SOBOTOVÁ, J.; JENÍKOVÁ, Z.; ČIŽMÁROVÁ, E. a HORNÍK, J. *Nauka o materiálu I. a II.: Cvičení*. Dotisk 1. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2016. ISBN 978-80-01-05550-2.
- [25] DUŠEK, J. *Tvrdost, mikrotvrdost, nanotvrdost – čisté kovy měřené metodou DSI*. Brno, 2008.. Disertace. Masarykova univerzita v Brně, Přírodovědecká fakulta. Vedoucí práce Vladislav Navrátil.
- [26] SANGWAL, K. Review: Indentation size effect, indentation cracks and microhardness measurement of brittle crystalline solids - some basic concepts and trends. *Crystal Research and Technology* [online]. 2009, **44**(10), 1019-1037 [cit. 2020-03-07]. DOI: 10.1002/crat.200900385. ISSN 02321300. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1002/crat.200900385>
- [27] ČSN EN ISO 6507-1. *Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda*. Praha: Český normalizační institut, 2018.
- [28] KROLCZYK, G.; NIESLONY, P. a LEGUTKO, S. Microhardness and Surface Integrity in Turning Process of Duplex Stainless Steel (DSS) for Different Cutting Conditions. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2014, **23**(3), 859-866 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1007/s11665-013-0832-4. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-013-0832-4>
- [29] MARUDA, R.; KROLCZYK, Gr.; MICHALSKI, M.; NIESLONY, P. a WOJCIECHOWSKI, S. Structural and Microhardness Changes After Turning of the AISI 1045 Steel for Minimum Quantity Cooling Lubrication. *Journal of Materials Engineering and Performance* [online]. 2017, **26**(1), 431-438 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.1007/s11665-016-2450-4. ISSN 1059-9495. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/s11665-016-2450-4>

- [30] ŽAGAR, S. a GRUM, J. Surface Integrity after Mechanical Hardening of Various Aluminium Alloys. *Strojnicki vestnik – Journal of Mechanical Engineering* [online]. 2011, 57(04), 334-344 [cit. 2020-05-31]. DOI: 10.5545/sv-jme.2010.092. ISSN 00392480. Dostupné z: <http://www.sv-jme.eu/article/surface-integrity-after-mechanical-hardening-of-various-aluminium-alloys/>
- [31] Metoda Vickers, ISO 6507: Vnitřní struktura materiálu. *JD Dvořák, s.r.o.* [online]. 2018 [cit. 2020-05-31]. Dostupné z: <https://www.testsysteme.cz/vickers-iso-6507>
- [32] ČEP, R. a J. PETRŮ. *Experimentální metody v obrábění: učební text* [online]. Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta strojní, Katedra obrábění a montáže, 2012 [cit. 2020-07-20]. ISBN 978-80-248-2533-5.
- [33] ČSN 41 2050. *Ocel 12 050*. Praha: Český normalizační institut, 1978.
- [34] INKOSAS, . Titanové slitiny Grade 1-11 - titanové plechy, tyče, trubky, dráty, příruby. *Inkosas a.s.* [online]. Praha [cit. 2020-06-14].
- [35] *Tungaloy* [online]. Tungaloy, 2020 [cit. 2020-06-16]. Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Tungaloy/tungaloycatalog/item.aspx?cat=6998031&fnum=903&mapp=IS&app=0&GFSTYP=I>
- [36] *TaeuguTec* [online]. TaeuguTec, 2020 [cit. 2020-06-14]. Dostupné z: <http://www.imc-companies.com/Tungaloy/tungaloycatalog/Family.aspx?fnum=903&mapp=IS&app=206&GFSTYP=I>
- [37] ČSN EN ISO 4287. *Geometrické požadavky na výrobky (GPS) - Struktura povrchu: Profilová metoda - Termíny, definice a parametry struktury povrchu*. Praha: Český normalizační institut, 1999.

Seznam obrázků

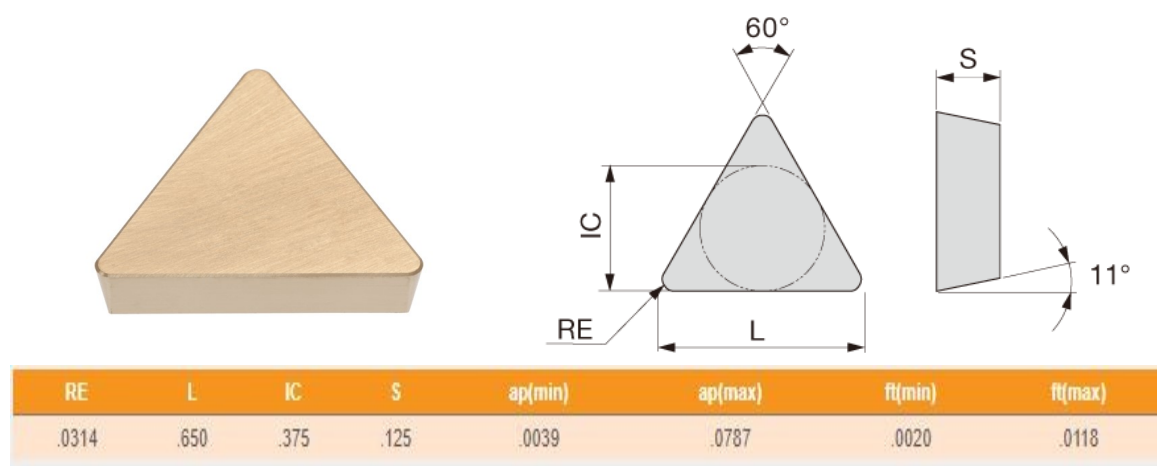
Obrázek 1, Soustružení [1]	2
Obrázek 2, Řezný klín [3].....	3
Obrázek 3, Geometrické charakteristiky [1]	3
Obrázek 4, Lokalizace oblastí deformace [4].....	5
Obrázek 5, Bodový styk [4].....	7
Obrázek 6, Tvarové variace nárůstu [4].....	7
Obrázek 7, Plošný styk [4].....	8
Obrázek 8, Příklad průběhu zbytkového napětí od povrchu do materiálu [4]	10
Obrázek 9, Filtrované složky povrchu [13] – upraveno.....	12
Obrázek 10, Průměrná šířka profilu [37]	13
Obrázek 11, Plošná drsnost [15].....	14
Obrázek 12, Princip difrakce rentgenových paprsků [17]	15
Obrázek 13, Tenzometrická růžice [18].....	16
Obrázek 14, Barevné variace povrchu třísky, zvětšení x20 [20]	17
Obrázek 15, Schéma zatěžování [24].....	19
Obrázek 16, Schéma měření dle Vickerse [24]	21
Obrázek 17, Průběh zpevnění styk [4].....	23
Obrázek 18, Metoda šikmého řezu [18]	25
Obrázek 19, Příprava vzorku pro měření mikrotvrdosti [28] – upraveno.....	25
Obrázek 20, Alternativní metoda [31]	26
Obrázek 21, Rozdělení rotačního dílce provedením kolmého řezu	29
Obrázek 22, Příprava plochy pro měření průběhu zpevnění	29
Obrázek 23, Schéma pro odvození funkce $h=f(x)$	30
Obrázek 24, Implementace prořezu	32
Obrázek 25, Soustruh SU50	33
Obrázek 26, Nůž s vyměnitelnou břitovou destičkou	34
Obrázek 27, Upnutí do sklíčidla – vlevo Ti6Al4V, vpravo ocel 12 050	35
Obrázek 28, Tříska po obrábění oceli 12050	35
Obrázek 29, Tříska po obrábění Ti6Al4V	36
Obrázek 30, Oddělené části na pásové pile	36
Obrázek 31, Metalografická pila Struers Secotom 60	37
Obrázek 32, Měřicí sestava	39
Obrázek 33, Popis měřicí sestavy	40
Obrázek 34, Schéma vzájemné polohy řad tvořících jeden průběh.....	42
Obrázek 35, Ti6Al4V – strana A.....	45
Obrázek 36, Ti6Al4V – strana B.....	46
Obrázek 37, Ti6Al4V – porovnání průběhů ze strany A a B.....	47
Obrázek 38, Ti6Al4V – zprůměrovány průběhy ze stran A a B	48
Obrázek 39, ocel 12050 – strana A	49
Obrázek 40, Obrobený povrch oceli 12050 (C45)	50
Obrázek 41, ocel 12050 – strana B.....	51
Obrázek 42, ocel 12050 - porovnání průběhů ze stran A a B	52
Obrázek 43, ocel 12050 – zprůměrovány průběhy ze stran A a B.....	53

<i>Obrázek 44, Ti6Al4V a ocel 12050 – porovnání zprůměrovaných hodnot průběhů</i>	54
<i>Obrázek 45, Povrch T1 – zvětšení x40</i>	57
<i>Obrázek 46, Povrch C1 – zvětšení x40</i>	58
<i>Obrázek 47, Specifikace VBD [35]</i>	67
<i>Obrázek 48, Specifikace soustružnického nože [36]</i>	67

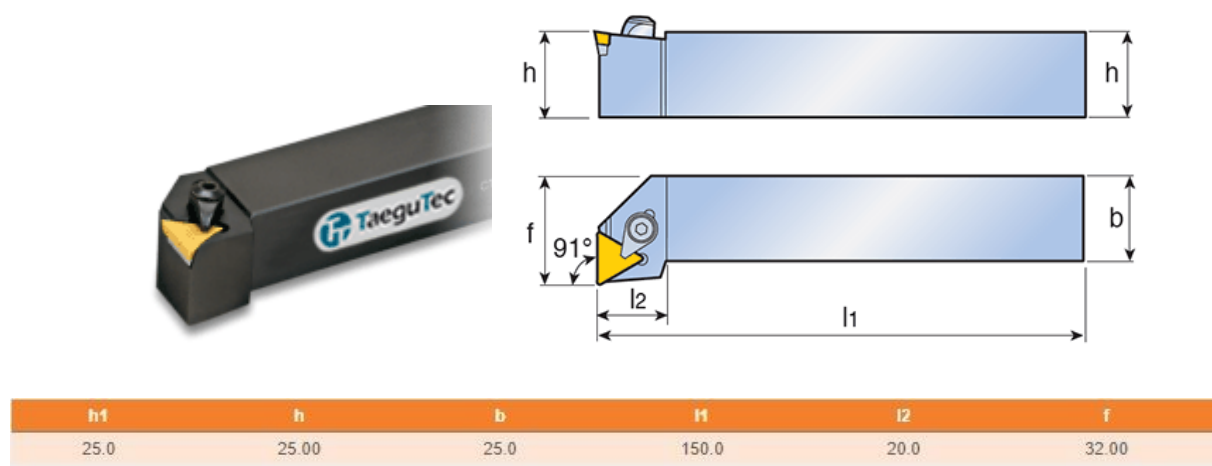
Seznam tabulek

<i>Tabulka 1, Označení tvaru třísek [4]</i>	4
<i>Tabulka 2, Stupnice dle Rockwella [24]</i>	19
<i>Tabulka 3, Rozsah zkušebního zatížení pro metodu dle Vickerse [27]</i>	23
<i>Tabulka 4, Popis kótovaných rozměrů Obrázek 23</i>	30
<i>Tabulka 5, Výběr mechanických vlastností obou materiálů</i>	32
<i>Tabulka 6, Řezné podmínky</i>	33
<i>Tabulka 7, Značení a geometrická specifikací vytvořených vzorků</i>	38
<i>Tabulka 8, Minimální vzdálenosti</i>	41

Příloha 1 – Specifikace soustružnického nože a vyměnitelné břitové destičky

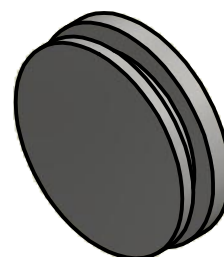


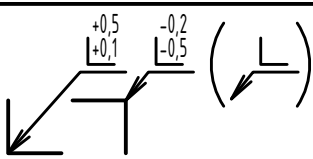

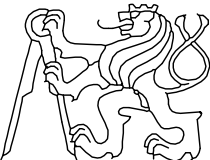
Obrázek 47, Specifikace VBD [35]

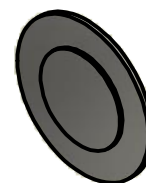
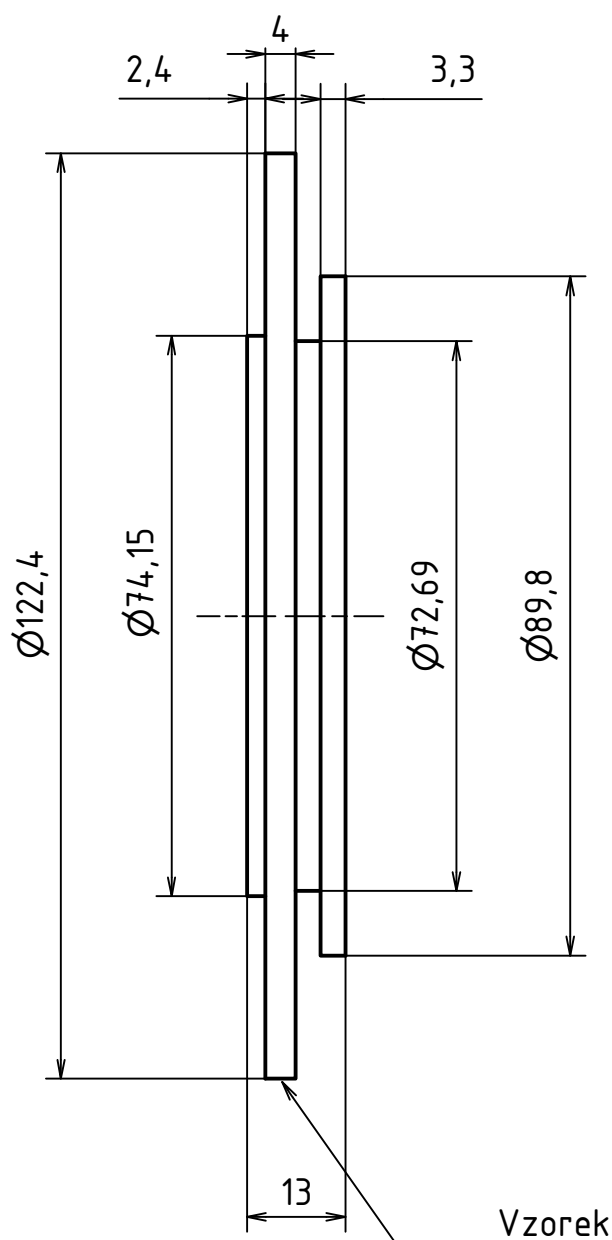


Obrázek 48, Specifikace soustružnického nože [36]


Příloha 2 – Výkresy polotovarů pro výrobu vzorků

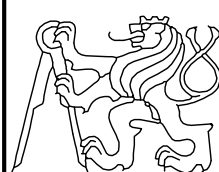


MATERIÁL: C45 (12 050)													
POLOTOVAR: -													
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015													
PŘESNOST ISO 2768 - mK													
VŠEOB. TOL. ISO 8062 -								INDEX					
								ZMĚNA		DATUM		PODPIS	
		Autor		Datum		Podpis		Datum		HMOTNOST 0,356 kg		MĚŘÍTKO	
NAVRHL		Matouš Uhlík		05.06.2020		PŘEZK.				SESTAVA		2:1 (1:2)	
KRESLIL		Matouš Uhlík		05.06.2020		SCHVÁLIL				KUSOVNÍK		PROMÍTÁNÍ:  (ISO E)	
 ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE						FAKULTA STROJNÍ		NÁZEV					
								Příloha 1, ocel 12050					
								TYP:					
						ČÍSLO VÝKRESU							
						1							
						LIST: 1 /							



MATERIÁL: Ti6Al4V					
POLOTOVAR: -					
TOLEROVÁNÍ DLE ISO 8015					
PŘESNOST ISO 2768 - mK					
VSEOB. TOL. ISO 8062 -					
		INDEX	ZMĚNA	DATUM	PODPIS

VSLOB. POL. ISO 0002 -					INDEX	ZNAKA	DATUM	PODS
	Autor	Datum		Podpis	Datum	HMOTNOST 0,415 kg	MĚŘITKO 1:1 (1:5)	
NAVRHL	Matouš Uhlík	05.06.2020	PŘEZK.			SESTAVA		
KRESLIL	Matouš Uhlík	07.06.2020	SCHVALIL			KUSOVNÍK	PROMÍTÁNÍ:  (ISO E)	



FAKULTA
STROJNÍ

NA7FV

Příloha 2, Ti6Al4V

ČÍSLO VÝKRESU

2

LIST: 1 / 1

Příloha 3 – Pracovní postup pro práci s mikrotvrdoměrem Struers Duramin

Úvod

Měřicí sestavu tvoří mikrotvrdměr a vyhodnocovací software Hardtest na připojeném počítači. Software je určený pro definici parametrů zkoušky, sběr dat a jejich export. Příkazy pro provedení vtisku jsou realizovány na mikrotvrdoměru, nikoliv v prostředí softwaru.

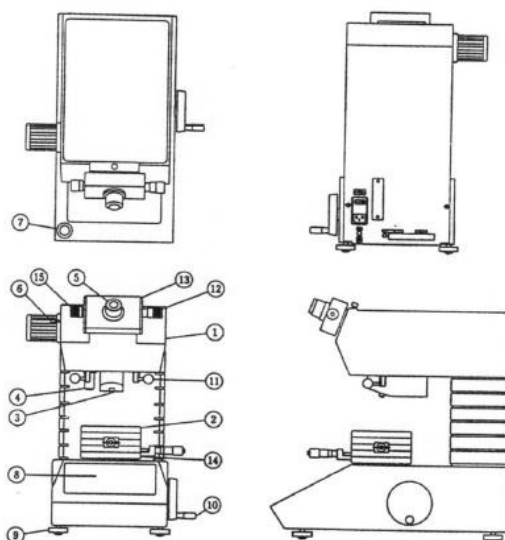
Mikrotvrdměr disponuje:

- CCD kamerou – pro vyhodnocení diagonál vtisku v softwarovém prostředí Hardtest
- Optickým mikroskopem – pro vyhodnocení diagonál vtisku přímo v systémovém prostředí mikrotvrdoměru
- XY posuvným stolem se stavitelnou výškou
- Revolverovou hlavou – nosič indentoru (jehlan, vrcholový úhel 136°) a dvou objektivů (zvětšení: X40 a X10)

Pro měření je vhodné si připravit Excel soubor a naměřené hodnoty ihned zapisovat (možnost vizualizace naměřených hodnot, lepší následná dostupnost dat)

Detailnější popis:

4.1. Celkový pohled



Legenda:

Obr. 4.1 Celkový pohled

- 1 - tělo tvrdoměru
- 2 - pracovní stůlek X-Y
- 3 - vnikací těleso Vickers
- 4 - objektiv
- 5 - okulár
- 6 - nastavení polohy prisma
- 7 - vodováha
- 8 - LCD displej
- 9 - šroub pro nastavení horizontální roviny tvrdoměru
- 10 - kolo s rukojetí pro svislý posuv
- 11 - revolverová otočná hlava
- 12 - pravý mikrometrický šroub optické hlavy
- 13 - optická hlava
- 14 - základní deska pracovního stolku
- 15 - levý mikrometrický šroub optické hlavy

Popis mikrotvrdoměru

Měření

Následuje v bodech popsany postup pro provedení měření a získání dat.

1. Zapnutí PC a mikrotvrdoměru

Zapnutí a vypnutí se provádí přepnutím spínače na zadní straně mikrotvrdoměru.

2. Upnutí vzorku v dostatečné vzdálenosti od revolverové hlavy

Vzorek se upíná do přípravku na XY stolku, fixace je zajištěna přítlačnou silou dvou čelistí. Posuv v rovině XY se provádí manuálně pomocí mikrometrických šroubů. Posuv v ose Z je manuálně realizován *kolem s rukojetí pro svislý posuv* (obrázek 1, č. 10).

3. Spuštění programu Hardtest – umístěn na



ploše

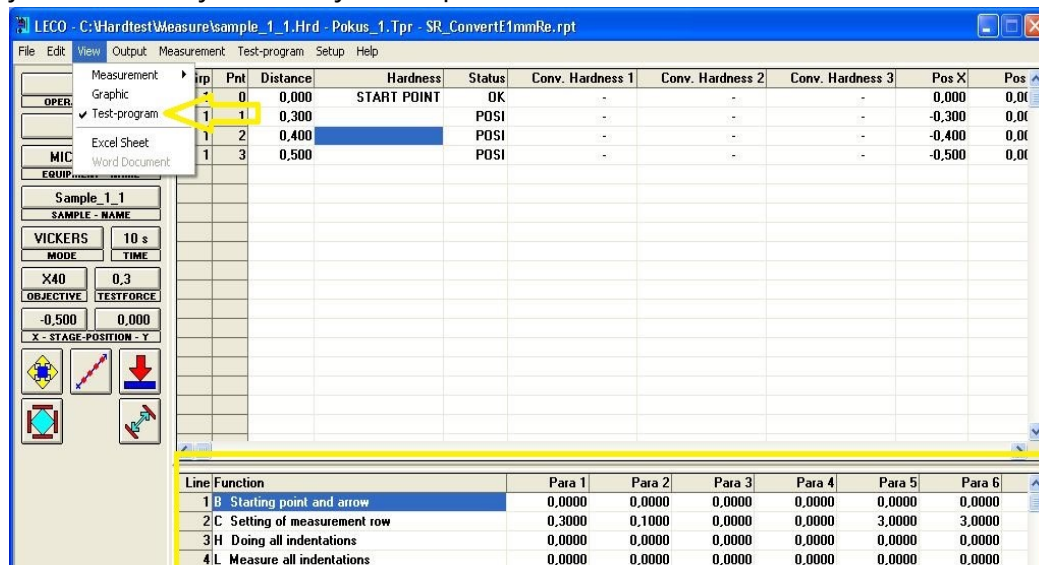
4. Přihlášení pomocí kliknutí na ikonu LOGON –

možno využít uživatele „repair“

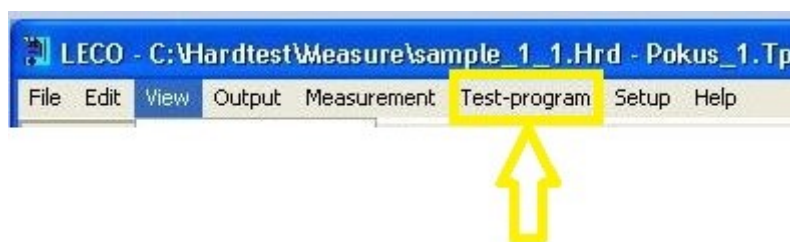
Grp	Pnt	Distance	Hardness	Status	Pos X	Pos Y	Diag X	Diag Y	Ref	Comment
1	1	0.000	58,3 HV 0.5	OK	1,737	0,000	138,4	113,5	0	
1	2	0.000	103 HV 0.5	OK	7,080	5,124	93,5	95,6	0	
1	3	0.000	89,4 HV 0.5	OK	7,080	5,124	96,4	107,3	0	
1	4	0.000	22,8 HV 0.5	OK	-12,075	-0,908	182,0	221,0	0	
1	5	0.000	7,0 HV 0.5	OK	0,000	0,000	333,0	385,0	0	
1	6	0.000	8,4 HV 0.5	OK	0,000	0,000	320,0	343,0	0	
1	7	0.000	4,2 HV 0.5	OK	0,000	0,000	455,0	468,0	0	
1	8	0.000	108 HV 0.5	OK	0,000	0,000	91,2	93,4	0	
1	9	0.000	101 HV 0.5	OK	0,000	0,000	98,4	92,6	0	
1	10	0.000	5,2 HV 0.5	OK	7,096	5,112	421,7	415,2	0	
1	11	0.000	5,2 HV 0.5	OK	7,096	5,112	423,9	417,3	0	
1	12	0.000	5,2 HV 0.5	OK	7,096	5,112	417,3	419,2	0	
1	13	0.000	5,2 HV 0.5	OK	7,096	5,112	424,6	416,1	0	
1	14	0.000	89,9 HV 0.5	OK	7,096	5,112	101,7	101,4	0	
1	15	0.000	92,7 HV 0.5	OK	7,096	5,112	97,0	103,0	0	
1	16	0.000	5,4 HV 0.5	OK	7,096	5,112	412,8	408,8	0	
1	17	0.000	87,2 HV 0.5	OK	7,096	5,112	102,7	103,4	0	
1	18	0.000	87,4 HV 0.5	OK	7,096	5,118	102,3	103,7	0	
1	19	0.000	86,5 HV 0.5	OK	7,096	5,109	102,6	104,5	0	
1	20	0.000	90,7 HV 0.5	OK	7,096	5,118	102,8	99,4	0	
1	21	0.000	101 HV 0.5	OK	7,096	5,368	100,1	91,0	0	
1	22	0.000	103 HV 0.5	OK	7,096	5,366	99,3	90,1	0	
1	23	0.000	100 HV 0.5	OK	7,096	5,366	100,6	91,9	0	
1	24	0.000	99,5 HV 0.5	OK	7,096	5,365	101,4	91,6	0	
1	25	0.000	91,9 HV 0.5	OK	7,096	5,112	98,0	102,8	0	

5. Definice parametrů zkoušky

5.1. Ve vodorovném ovládacím panelu možnost „View“, zaškrtnout „Test-program“. Tímto krokem se zobrazí aktuálně nastavený program měření v dolní části obrazovky – jednotlivé kroky nastaveny ve sloupci Function



5.2. Pro vytvoření nového programu je třeba označit všechny řádky (přidržením levého tlačítka myši a tažením přes všechny řádky), dále kliknout na „Test – program“ (viz obrázek) a zvolit Cut function, případně použít klávesovou zkratku CTRL+S. Tím se odstraní všechny dosavadní definované funkce.



5.3. Levým kliknutím myši do řádku a využitím klávesové zkratky CTRL+A se otevře okno pro vložení funkce, tlačítkem OK se funkce vloží. Do každého řádku jsou vloženy stejným způsobem následující funkce:

5.3.1. První řádek – „**B Starting point and arrow**“ - definice počátečního bodu a směru řady.

5.3.2. Druhý řádek – „**C Setting of measurement row**“ - nastavení řady vtisků.

Parameter for C Setting of measurement row

Function : C Setting of measurement row

Number of points :

Start distance :

Following dist. :

Change point :

Change distance :

Row distance :

Row number : ☐ Connect to row before
(0 = automatic)

Automatic info :

Row structure

☒ Single row

☐ Double row

☐ Triple row

☐ Four rows

☐ Five rows

5.3.2.1. **Number of points** – počet vtisků

5.3.2.2. **Start distance** – vzdálenost prvního vtisku od počátečního bodu (předepsáno normou ČSN EN ISO 6507-1) – norma k dispozici u návodu.

5.3.2.3. **Following distance** – vzdálenost mezi jednotlivými vtisky (předepsáno normou ČSN EN ISO 6507-1) - norma k dispozici u návodu.

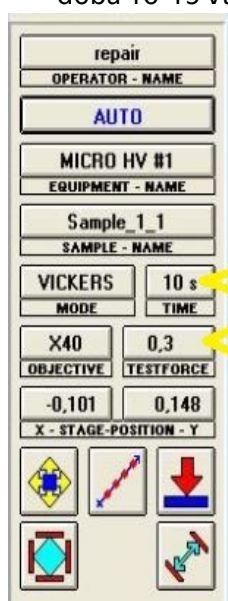
5.3.3. Třetí řádek – „**H Doing all indentations**“ provedení všech vtisků dle parametrů nastavených v druhém řádku

5.3.4. Čtvrtý řádek – „**L Measure all indentations**“ měření v softwarovém prostředí pomocí CCD kamery.

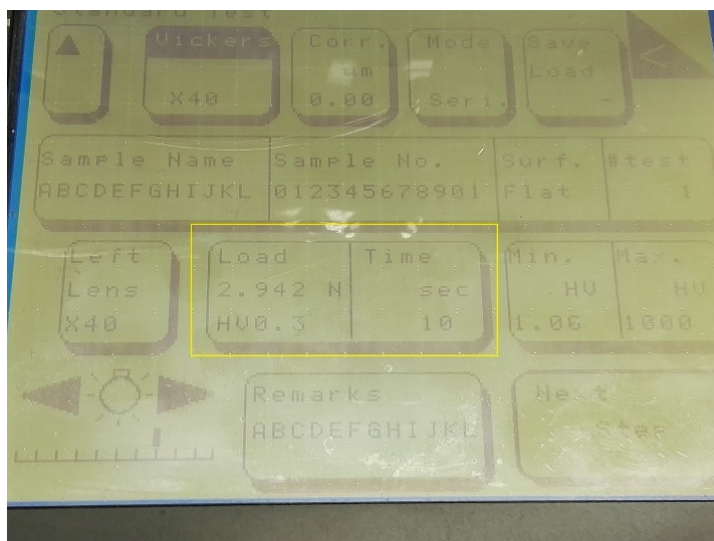
5.3.5. Výsledné funkce by měly vypadat následovně.

Line	Function
1	B Starting point and arrow
2	C Setting of measurement row
3	H Doing all indentations
4	L Measure all indentations

6. Nyní je třeba vytvořený program uložit, pomocí **File – Save test program as** a uložit pod vlastním názvem do složky TestPrg (je nastavena jako defaultní úložiště programů měření). V případě potřeby měření většího počtu řad o různých vzdálenostech nebo počtech vtisků, stačí jen program upravit poklepáním na **Setting of measurement row**, úpravou parametrů a opětovným uložením.
7. Dále je třeba zvolit dobu zatížení a zatěžující sílu – tuto volbu je třeba zanést jak do softwarového prostředí na PC, tak do mikrotvrdoměru. Dle normy je standardní zatěžující doba 10-15 vteřin.

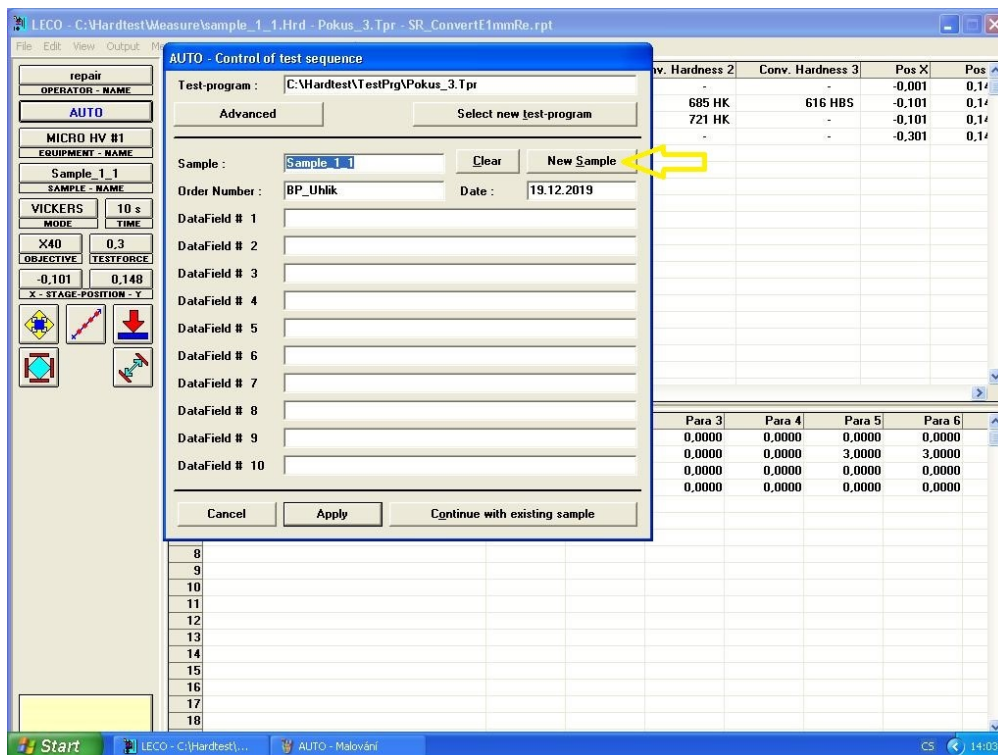


SOFTWAREVÉ PROSTŘEDÍ



DISPLAY MIKROTVRDOMĚRU

8. Kliknutím na ikonu **AUTO** (viz obrázek) se iniciuje měření.
 - 8.1. První řádek pod názvem Test-program vyzývá k výběru programu měření – zvolit program měření, který byl vytvořen v předchozích bodech.
 - 8.2. Řádek Sample slouží pro vyplnění označení měřeného vzorku. Zbylé řádky není nutné vyplňovat. Po vyplnění **kliknout na New Sample**.

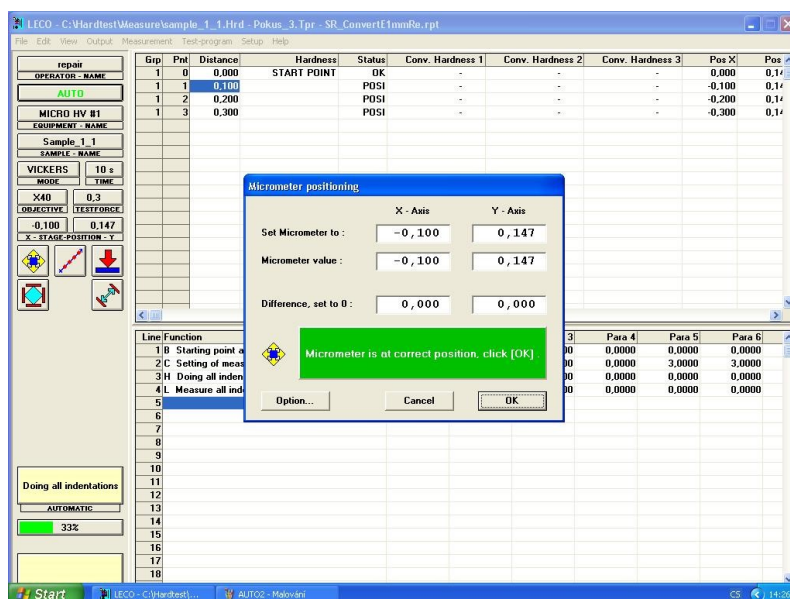


9. Zobrazí se okno, ve kterém by měl být viděn pohled z kamery – pokud není, posuvem prismatu se zobrazí

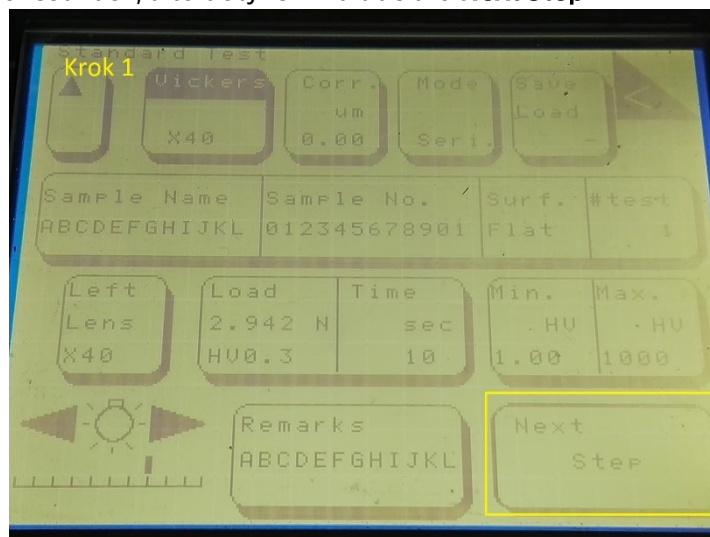
Pokud je požadován pohled na vtisk v prostředí Hardtest je nutné povytáhnout prisma (obrázek 1, č. 6) směrem od zařízení. Posuv prismu směrem k mikrotvrdoměru zajistí pohled pomocí optického mikroskopu.

10. Posuvem XY (mikrometrickými šrouby) je třeba nastavit polohu osového kříže na místo, kam má být umístěn počátek. V tomto místě je výhodné vynulovat hodnoty na displejích mikrometrů dlouhým podržením tlačítka ZERO/ABS, které se nachází fyzicky na mikrometru. Pozice se potvrdí kliknutím pravým tlačítkem myši a volbou „**Ready – position OK**“. Následuje volba směru měření, která se potvrdí kliknutím levým tlačítkem myši.

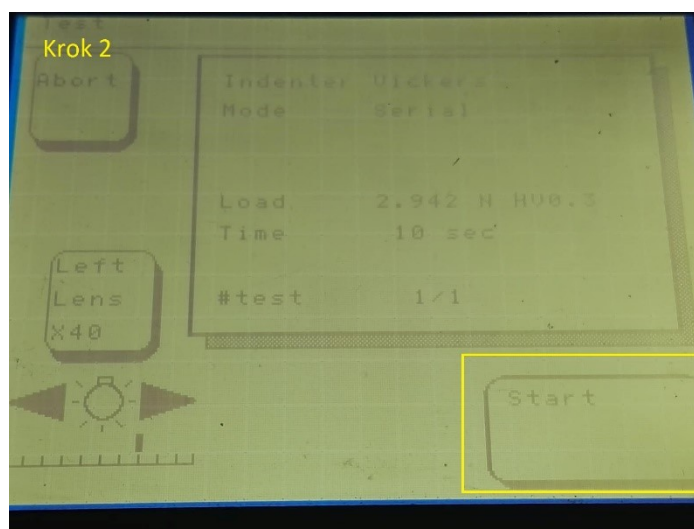
11. Zobrazí se okno Micrometer positioning – první řádek je cílová hodnota, druhý řádek je aktuální. Po manuálním nastavení souřadnic X a Y na cílovou hodnotu se objeví zpráva – „Micrometer is at correct position, click OK“. **!NEKLIKAT OK!** Na tlačítko OK kliknout až v kroku 13.



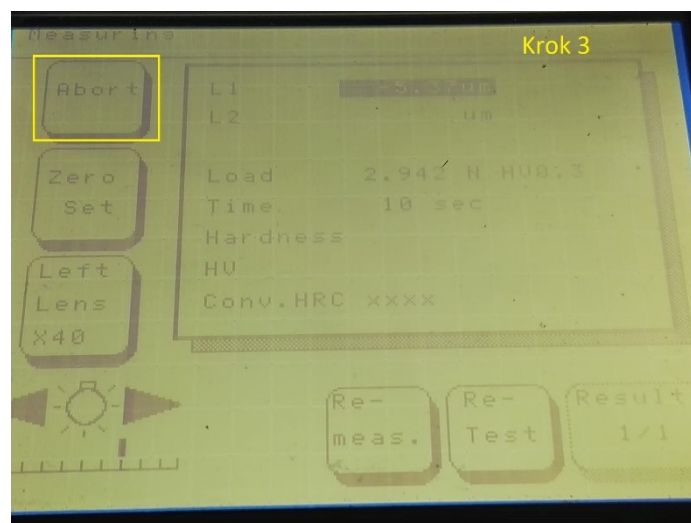
12. Nyní je třeba provést vtisk, a to dotykem na tlačítko **Next Step**.



Následně kliknout **Start** na displeji mikrotvrdoměru. Revolverová hlava vymění objektiv za indentor automaticky.

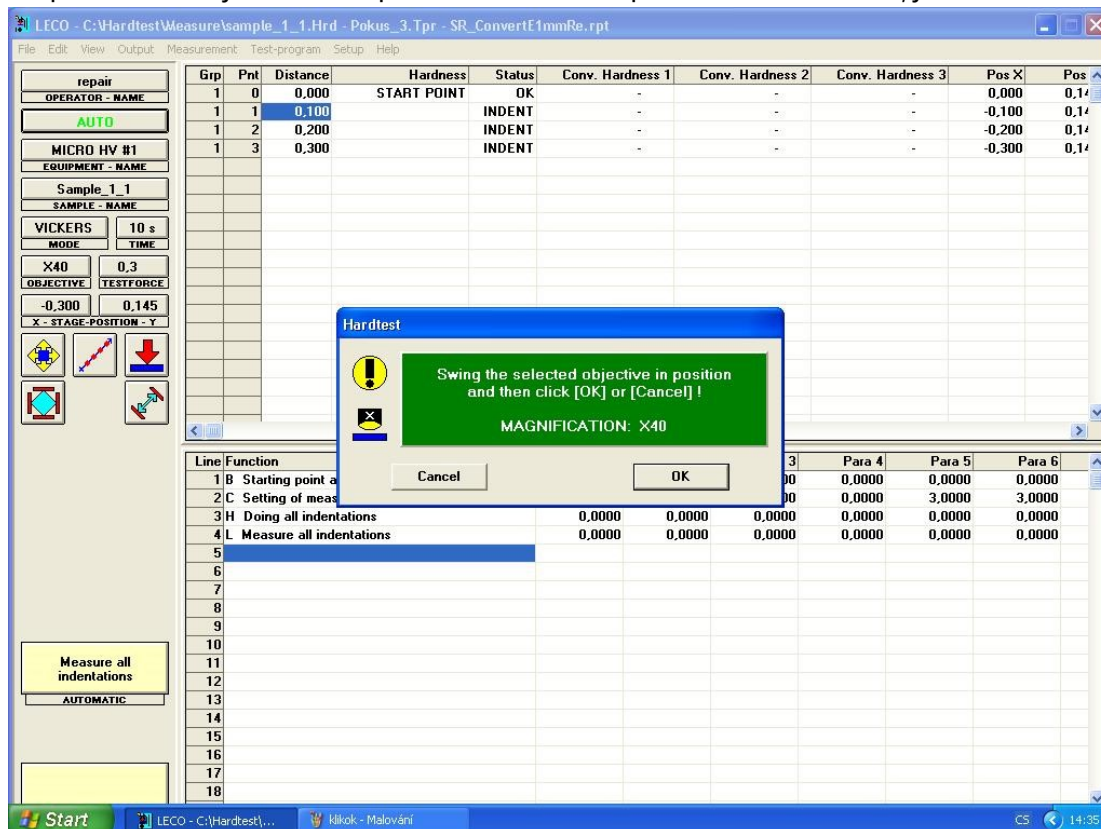


Ihned po provedení vtisku stisknout tlačítko **Abort**. Případně je možné přeměřit vtisk integrovaným okulárem.

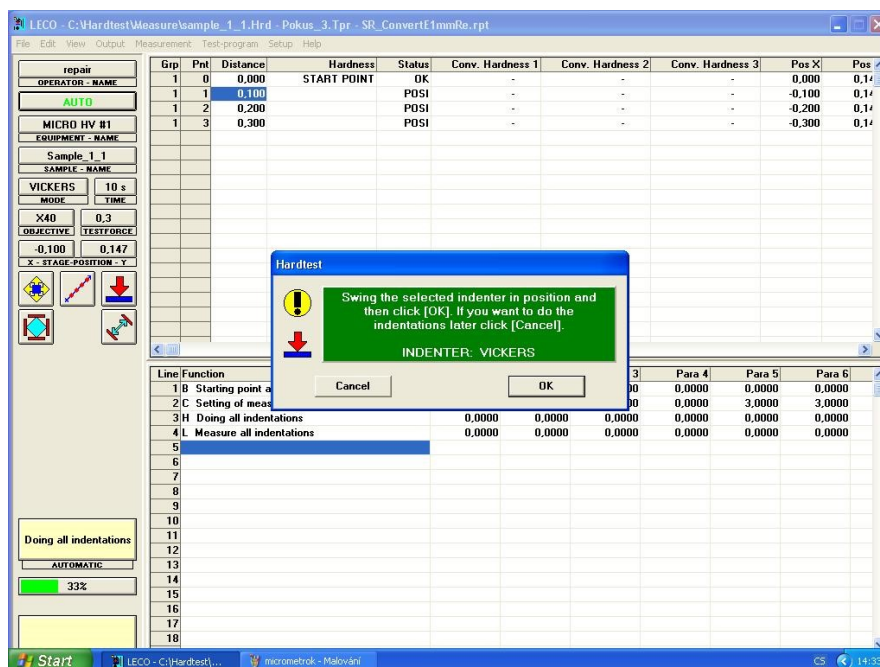


13. Až nyní kliknout **OK** v softwarovém prostředí na počítači

14. Na počítači se objeví textové pole viz obrázek. Neprovádět žádnou akci, jen **kliknout OK**.

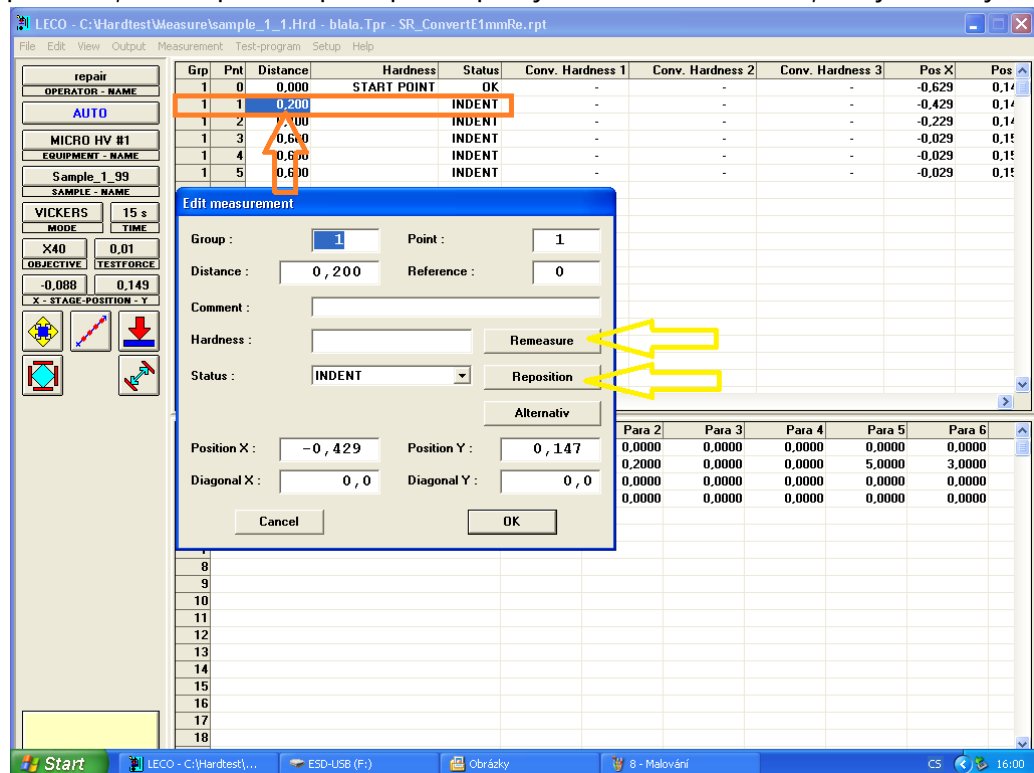


15. Znovu se vám zobrazí navádění na pozici nového vtisku. Opakujte postup popsany v krocích 11-14. Po provedení posledního vtisku je třeba manuálně otočit revolverovou hlavou na zvětšení X40 a kliknout **OK**.

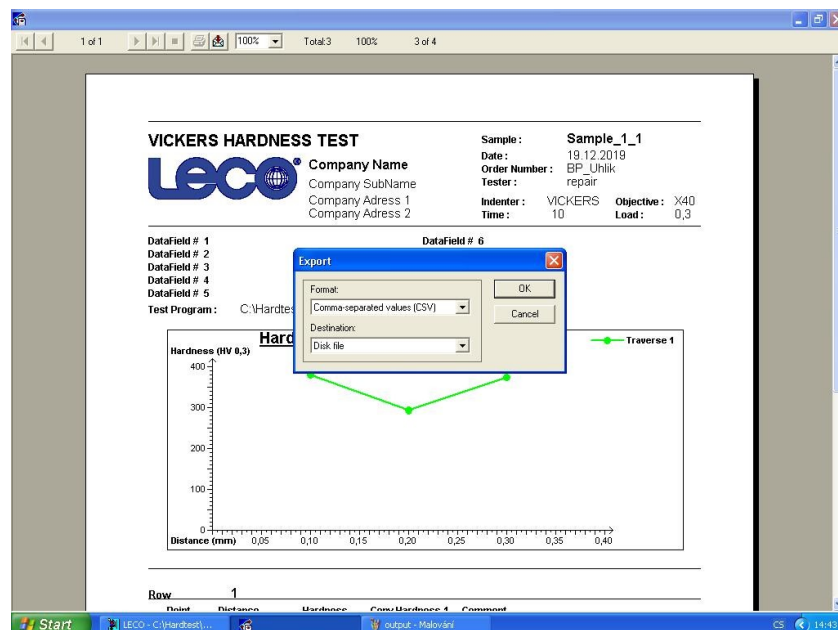
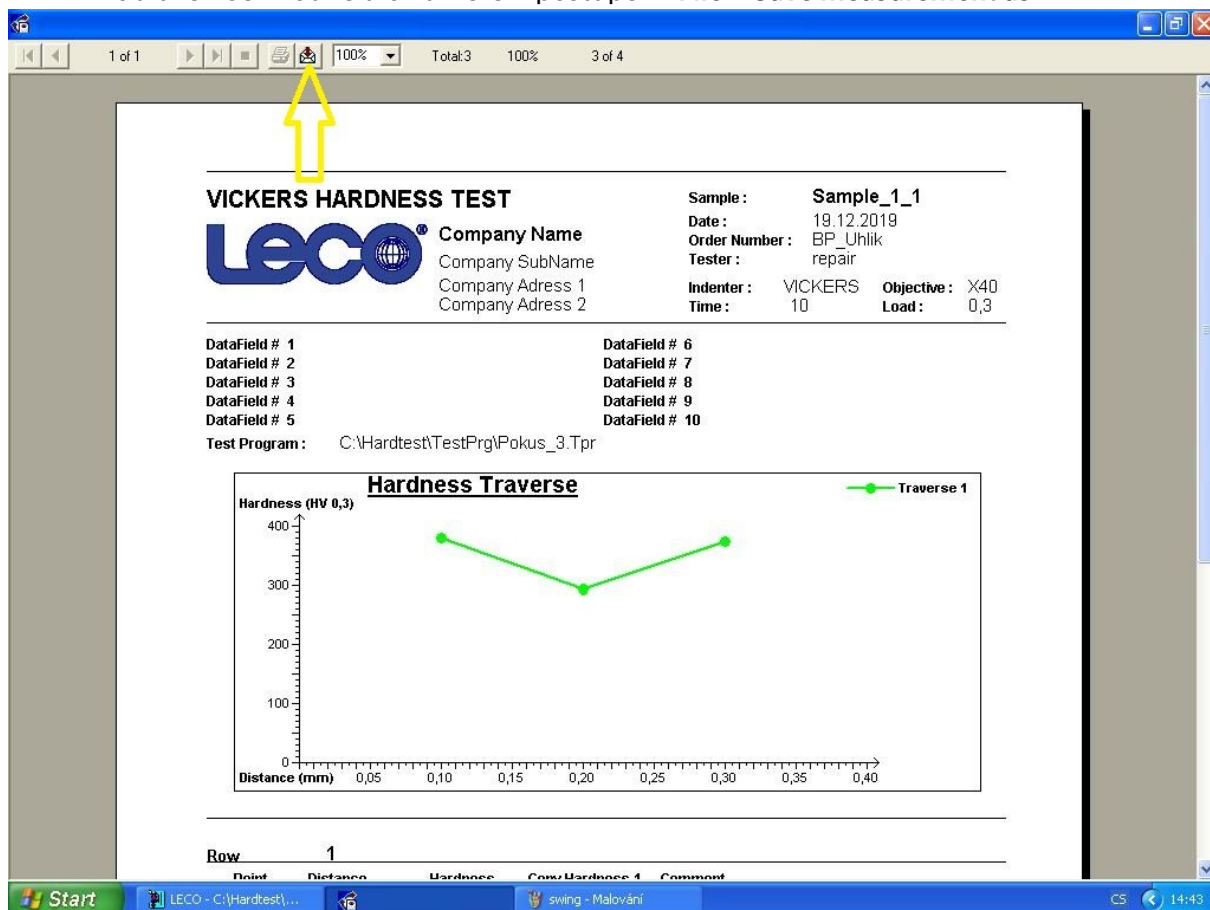


označit všechny 4 vrcholy vtisku. Po jejich označení se výběr potvrdí kliknutím levým tlačítkem myši.

17. Pokud se dostanete do nestandardní situace a je třeba přepozicovat na konkrétní vtisk nebo ho přeměřit, lze tak provést poklepáním pravým tlačítkem na řádek, kde je žádaný vtisk.



18. Export do CSV souboru je proveden kliknutím na **Output – Page View** (ikona obálky s šipkou)
- viz obrázek. Je vhodné uložit měření postupem: **File – Save measurement as**.



Příloha 4 – Tabulky naměřených hodnot

T1_A

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5
0,136	0,038335	374	374	374	382	398	390	391	394	392,5
0,216	0,060755	369	372	370,5	377	366	371,5	388	383	385,5
0,251	0,070533	372	363	367,5	382	378	380	370	374	372
0,34	0,095315	386	368	377	376	374	375	382	389	385,5
0,42	0,117488	386	386	386	382	371	376,5	377	372	374,5
0,455	0,127159	369	372	370,5	370	377	373,5	374	383	378,5
0,544	0,151666	362	357	359,5	352	351	351,5	358	347	352,5
0,624	0,173593	338	326	332	392	393	392,5	382	377	379,5
0,659	0,183155	350	329	339,5	333	343	338	357	365	361
0,748	0,207387	324	341	332,5	335	331	333	302	305	303,5
0,828	0,229066	337	339	338	328	339	333,5	340	333	336,5
0,863	0,23852	346	341	343,5	304	309	306,5	331	341	336
0,952	0,262476	366	353	359,5	326	330	328	325	325	325
1,032	0,283907	339	350	344,5	328	331	329,5	328	335	331,5
1,067	0,293252	346	330	338	337	331	334	332	334	333

T1_A

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,136	0,038335	385,5	10,0374299	5,795112884
0,216	0,060755	375,8333333	8,38649708	4,841946349
0,251	0,070533	373,1666667	6,33113997	3,655285367
0,34	0,095315	379,1666667	5,57524289	3,218867986
0,42	0,117488	379	6,14410286	3,547299442
0,455	0,127159	374,1666667	4,04145188	2,333333333
0,544	0,151666	354,5	4,35889894	2,516611478
0,624	0,173593	368	31,8472919	18,38704254
0,659	0,183155	346,1666667	12,8679188	7,429296363
0,748	0,207387	323	16,8893458	9,751068318
0,828	0,229066	336	2,29128785	1,322875656
0,863	0,23852	328,6666667	19,5597376	11,29281974
0,952	0,262476	337,5	19,1115149	11,03403825
1,032	0,283907	335,1666667	8,14452782	4,702245327
1,067	0,293252	335	2,64575131	1,527525232

T1_A, měřeno v blízkosti povrchu (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,06	0,016947	362	360	361	369	365	367	357	354	355,5
0,08	0,022584	369	370	369,5	374	375	374,5	370	373	371,5
0,1	0,028214	352	355	353,5	375	370	372,5	359	362	360,5
0,13	0,036649	346	350	348	381	385	383	375	378	376,5

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,016947	361,2	5,751811309	3,320809808
0,08	0,022584	371,8	2,516611478	1,452966315
0,1	0,028214	362,2	9,609023537	5,547772326
0,13	0,036649	369,2	18,61674873	10,74838489

T1_B

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5
0,136	0,038335	368	368	368	361	357	359	367	359	363
0,216	0,060755	353	354	353,5	352	355	353,5	355	345	350
0,251	0,070533	353	342	347,5	345	349	347	350	355	352,5
0,34	0,095315	317	320	318,5	346	342	344	367	340	353,5
0,42	0,117488	335	333	334	347	349	348	340	328	334
0,455	0,127159	342	340	341	340	342	341	340	342	341
0,544	0,151666	370	330	350	333	341	337	324	325	324,5
0,624	0,173593	330	333	331,5	337	340	338,5	331	330	330,5
0,659	0,183155	327	321	324	339	325	332	331	335	333
0,748	0,207387	357	323	340	344	331	337,5	344	330	337
0,828	0,229066	329	323	326	335	345	340	342	335	338,5
0,863	0,23852	322	334	328	349	320	334,5	340	345	342,5
0,952	0,262476	340	330	335	335	304	319,5	337	314	325,5
1,032	0,283907	335	345	340	332	338	335	325	320	322,5
1,067	0,293252	325	333	329	345	330	337,5	325	330	327,5

T1_B

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5	HV_mikroskop	HV_kamera	HV 0,5
0,136	0,038335	372	359	365,5	359	362	360,5
0,216	0,060755	-	-	-	-	-	-
0,251	0,070533	344	337	340,5	340	342	341
0,34	0,095315	352	353	352,5	357	352	354,5
0,42	0,117488	-	-	-	-	-	-
0,455	0,127159	336	331	333,5	332	330	331
0,544	0,151666	326	328	327	355	349	352
0,624	0,173593	-	-	-	-	-	-
0,659	0,183155	333	321	327	326	325	325,5
0,748	0,207387	345	333	339	342	335	338,5
0,828	0,229066	-	-	-	-	-	-
0,863	0,23852	340	355	347,5	345	340	342,5
0,952	0,262476	344	329	336,5	322	321	321,5
1,032	0,283907	-	-	-	-	-	-
1,067	0,293252	321	331	326	340	340	340

T1_B

Počet měření n	x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
5	0,136	0,038334872	363,2	3,65034245	1,632482772
3	0,216	0,060754708	352,3333333	2,020725942	1,166666667
5	0,251	0,07053305	345,7	5,007494383	2,239419568
5	0,34	0,095314721	344,6	15,17563837	6,7867518
3	0,42	0,117488291	338,6666667	8,082903769	4,666666667
5	0,455	0,127158807	337,5	4,873397172	2,179449472
5	0,544	0,15166606	338,1	12,69054766	5,675385449
3	0,624	0,173592679	333,5	4,358898944	2,516611478
5	0,659	0,18315507	328,3	3,99374511	1,78605711
5	0,748	0,207387147	338,4	1,193733639	0,533853913
3	0,828	0,229066136	334,8333333	7,686568372	4,437842319
5	0,863	0,238520105	339	7,71362431	3,449637662
5	0,952	0,262476253	327,6	7,765307463	3,472751071
3	1,032	0,283906937	332,5	9,013878189	5,204164999
5	1,067	0,29325219	332	6,31466547	2,824004249

T1_A, měřeno v blízkosti povrchu (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	HV_mikrosko p	HV_kamera	Průměr	HV_mikrosko p	HV_kamera	Průměr	HV_mikrosko p	HV_kamer a	Průměr
0,06	0,01694 7	362	360	361	369	365	367	357	354	355,5
0,08	0,02258 4	369	370	369,5	374	375	374,5	370	373	371,5
0,1	0,02821 4	352	355	353,5	375	370	372,5	359	362	360,5
0,13	0,03664 9	346	350	348	381	385	383	375	378	376,5

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,016947	361,2	5,751811309	3,320809808
0,08	0,022584	371,8	2,516611478	1,452966315
0,1	0,028214	362,2	9,609023537	5,547772326
0,13	0,036649	369,2	18,61674873	10,74838489

T1_B, měřeno v blízkosti povrchu (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,06	0,016947	398	400	399	381	383	382	390	392	391
0,08	0,022584	365	370	367,5	385	380	382,5	375	380	377,5
0,1	0,028214	369	374	371,5	370	372	371	376	380	378
0,13	0,036649	365	370	367,5	365	365	365	374	377	375,5

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,016947	391	8,504900548	4,910306621
0,08	0,022584	375	7,637626158	4,409585518
0,1	0,028214	373,5	3,905124838	2,254624876
0,13	0,036649	369,3333333	5,484827557	3,166666667

T2, měřeno přímo na povrchu

d [mm]	d/D	korekční faktor	HV 0,5 bez korekce	HV 0,5
0,049735	0,000406	1	375	375
0,04844	0,000396	1	395	395
0,04971	0,000406	1	375	375
0,04993	0,000408	1	372	372
0,050795	0,000415	1	359	359

Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní odchylka
375,2	12,8918579	5,765414122

T1, zprůměrovány hodnoty ze strany A a B

x [mm]	h [mm]	Strana A; HV 0,5	Strana B; HV 0,5	Průměr	Směrodatná odchylka	Standartní chyba
0,136	0,038335	385,5	363,2	374,4	15,768	11,15
0,216	0,060755	375,8	352,3	364,1	16,617	11,75
0,251	0,070533	373,2	345,7	359,4	19,422	13,73333333
0,34	0,095315	379,2	344,6	361,9	24,442	17,28333333
0,42	0,117488	379,0	338,7	358,8	28,52	20,16666667
0,455	0,127159	374,2	337,5	355,8	25,927	18,33333333
0,544	0,151666	354,5	338,1	346,3	11,597	8,2
0,624	0,173593	368,0	333,5	350,8	24,395	17,25
0,659	0,183155	346,2	328,3	337,2	12,634	8,93333333
0,748	0,207387	323,0	338,4	330,7	10,889	7,7
0,828	0,229066	336,0	334,8	335,4	0,825	0,58333333
0,863	0,23852	328,7	339,0	333,8	7,3068	5,16666667
0,952	0,262476	337,5	327,6	332,6	7,0004	4,95
1,032	0,283907	335,2	332,5	333,8	1,8856	1,33333333
1,067	0,293252	335,0	332,0	333,5	2,1213	1,5

T1, zprůměrovány hodnoty z měření v blízkosti povrchu ze strany A a B (mimo normu)

h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,016946748	376	21,09535231	14,91666667
0,02258363	373	2,239171474	1,58333333
0,028214493	368	8,013876853	5,66666667
0,036649498	369	0,11785113	0,08333333

C1_A

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,1628	0,0583	240	239	239,5	244	248	246	263	264	263,5
0,3628	0,129	239	238	238,5	244	248	246	244	245	244,5
0,5628	0,1985	236	237	236,5	246	247	246,5	229	227	228
0,7628	0,2669	235	239	237	232	236	234	231	229	230
0,9628	0,3342	220	226	223	226	227	226,5	225	226	225,5
0,2628	0,0938	245	247	246	238	239	238,5	234	239	236,5
0,4628	0,1639	248	253	250,5	249	248	248,5	225	226	225,5
0,6628	0,2329	226	227	226,5	237	234	235,5	231	232	231,5
0,8628	0,3007	232	234	233	230	236	233	224	222	223
1,0628	0,3674	227	229	228	228	232	230	242	241	241,5
0,3128	0,1114	247	247	247	231	237	234	250	244	247
0,5128	0,1813	236	238	237	224	227	225,5	244	247	245,5
0,7128	0,2499	219	220	219,5	227	229	228	213	215	214
0,9128	0,3175	228	230	229	222	228	225	214	211	212,5
1,1128	0,3839	224	226	225	228	233	230,5	222	223	222,5

C1_A

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,1628	0,0583	263	263	263	258	256	257
0,3628	0,129	245	249	247	237	238	237,5
0,5628	0,1985	239	237	238	232	232	232
0,7628	0,2669	230	232	231	226	229	227,5
0,9628	0,3342	229	232	230,5	227	225	226
0,2628	0,0938	237	239	238	231	230	230,5
0,4628	0,1639	228	230	229	233	232	232,5
0,6628	0,2329	228	229	228,5	223	223	223
0,8628	0,3007	229	231	230	233	238	235,5
1,0628	0,3674	226	228	227	225	228	226,5
0,3128	0,1114	226	232	229	242	241	241,5
0,5128	0,1813	250	247	248,5	266	260	263
0,7128	0,2499	218	219	218,5	259	255	257
0,9128	0,3175	234	235	234,5	244	240	242
1,1128	0,3839	224	220	222	242	238	240

C1_A

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,1628	0,058347392	253,8	10,65715722	4,766025598
0,3628	0,129009553	242,7	4,396020928	1,965960325
0,5628	0,198542494	236,2	6,969576745	3,116889475
0,7628	0,266938599	231,9	3,681032464	1,646207763
0,9628	0,33419031	226,3	2,706473721	1,210371844
0,2628	0,093819147	237,9	5,538501602	2,476893215
0,4628	0,163917654	237,2	11,5195486	5,151698749
0,6628	0,232883125	229	4,769696007	2,133072901
0,8628	0,300707974	230,9	4,827007354	2,158703314
1,0628	0,367384673	230,6	6,238990303	2,790161286
0,3128	0,111449579	239,7	8,01249025	3,583294573
0,5128	0,181265541	243,9	13,91671657	6,223744853
0,7128	0,249946565	227,4	17,30390129	7,738539914
0,9128	0,31748508	228,6	11,03063915	4,933051794
1,1128	0,383873574	228	7,508328709	3,357826678

C1_B

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,1628	0,058347	266	263	264,5	246	251	248,5	257	257	257
0,3628	0,12901	254	259	256,5	237	236	236,5	249	247	248
0,5628	0,198542	233	235	234	236	243	239,5	239	243	241
0,7628	0,266939	251	253	252	233	235	234	218	221	219,5
0,9628	0,33419	231	227	229	219	222	220,5	240	234	237
0,2628	0,093819	240	238	239	247	252	249,5	239	240	239,5
0,4628	0,163918	241	230	235,5	227	233	230	251	233	242
0,6628	0,232883	237	242	239,5	236	238	237	238	239	238,5
0,8628	0,300708	255	241	248	220	223	221,5	228	227	227,5
1,0628	0,367385	242	238	240	234	234	234	217	217	217
0,3128	0,11145	252	252	252	244	232	238	261	255	258
0,5128	0,181266	234	241	237,5	242	248	245	235	230	232,5
0,7128	0,249947	226	229	227,5	232	234	233	238	235	236,5
0,9128	0,317485	224	229	226,5	231	235	233	217	220	218,5
1,1128	0,383874	225	227	226	227	232	229,5	220	219	219,5

C1_B

x [mm]	h [mm]	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr
0,1628	0,058347	260	256	258	274	275	274,5
0,3628	0,12901	251	248	249,5	257	251	254
0,5628	0,198542	229	227	228	247	245	246
0,7628	0,266939	255	246	250,5	240	241	240,5
0,9628	0,33419	233	231	232	240	238	239
0,2628	0,093819	240	239	239,5	266	259	262,5
0,4628	0,163918	232	235	233,5	227	228	227,5
0,6628	0,232883	221	221	221	228	230	229
0,8628	0,300708	213	215	214	242	245	243,5
1,0628	0,367385	218	220	219	245	247	246
0,3128	0,11145	271	267	269	263	264	263,5
0,5128	0,181266	232	231	231,5	248	250	249
0,7128	0,249947	239	237	238	238	235	236,5
0,9128	0,317485	231	229	230	242	241	241,5
1,1128	0,383874	228	229	228,5	243	241	242

C1_B

Počet měření n	x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
5	0,1628	0,058347	260,5	9,67600124	4,327239305
5	0,3628	0,12901	248,9	7,724959547	3,454706934
5	0,5628	0,198542	237,7	6,90651866	3,088689042
5	0,7628	0,266939	239,3	13,30695307	5,951050327
5	0,9628	0,33419	231,5	7,314369419	3,271085447
5	0,2628	0,093819	246	10,22252415	4,57165178
5	0,4628	0,163918	233,7	5,574495493	2,492990172
5	0,6628	0,232883	233	7,881941385	3,524911346
5	0,8628	0,300708	230,9	14,46288353	6,467998145
5	1,0628	0,367385	231,2	12,79453008	5,7218878
5	0,3128	0,11145	256,1	11,92895637	5,334791467
5	0,5128	0,181266	239,1	7,692528843	3,440203482
5	0,7128	0,249947	234,3	4,221966367	1,888120759
5	0,9128	0,317485	229,9	8,451331256	3,779550238
5	1,1128	0,383874	229,1	8,196035627	3,665378562

C1_A, měřeno v blízkosti povrchu (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	HV_mikrosko p	HV_kamera	Průměr	HV_mikroskop	HV_kamera	Průměr	HV_mikrosko p	HV_kamer a	Průmě r
0,06	0,02159	237	240	238,5	285	286	285,5	261	265	263
0,08	0,02876 5	258	262	260	254	255	254,5	244	245	244,5
0,1	0,03592 8	245	243	244	270	275	272,5	264	267	265,5
0,13	0,04665 2	244	244	244	256	260	258	268	266	267

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,02159	262	23,50709113	13,57182539
0,08	0,028765	253	7,858116823	4,536885863
0,1	0,035928	261	14,85204812	8,57483398
0,13	0,046652	256	11,59022577	6,691619967

C1_B, měřeno v blízkosti povrchu (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	HV_mikrosko p	HV_kamera	Průměr	HV_mikrosko p	HV_kamera	Průměr	HV_mikrosko p	HV_kamer a	Průmě r
0,06	0,02159	257	256	256,5	277	266	271,5	257	261	259
0,08	0,02876 5	258	254	256	247	241	244	250	249	249,5
0,1	0,03592 8	249	248	248,5	248	250	249	259	255	257
0,13	0,04665 2	243	241	242	248	245	246,5	246	246	246

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,02159	262,3333333	8,036375634	4,639803636
0,08	0,028765	249,8333333	6,00694043	3,468108674
0,1	0,035928	251,5	4,769696007	2,753785274
0,13	0,046652	244,8333333	2,466441431	1,424000624

C2, měřeno přímo na povrchu

d [mm]	d/D	korekční faktor	HV 0,5 bez korekce	HV 0,5
0,06018	0,000964	1	256	256
0,05495	0,000881	1	307	307
0,06027	0,000966	1	255	255
0,05401	0,000866	1	318	318
0,05512	0,000883	1	305	305

Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
288	30,18630154	13,49972445

T1, zprůměrovány hodnoty ze strany A a B

x [mm]	h [mm]	Strana A; HV 0,5	Strana B; HV 0,5	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,1628	0,058347	253,8	260,5	257,15	4,737615434	3,35
0,3628	0,12901	242,7	248,9	245,8	4,384062043	3,1
0,5628	0,198542	236,2	237,7	236,95	1,060660172	0,75
0,7628	0,266939	231,9	239,3	235,6	5,232590181	3,7
0,9628	0,33419	226,3	231,5	228,9	3,676955262	2,6
0,2628	0,093819	237,9	246	241,95	5,727564928	4,05
0,4628	0,163918	237,2	233,7	235,45	2,474873734	1,75
0,6628	0,232883	229	233	231	2,828427125	2
0,8628	0,300708	230,9	230,9	230,9	0	0
1,0628	0,367385	230,6	231,2	230,9	0,424264069	0,3
0,3128	0,11145	239,7	256,1	247,9	11,59655121	8,2
0,5128	0,181266	243,9	239,1	241,5	3,39411255	2,4
0,7128	0,249947	227,4	234,3	230,85	4,87903679	3,45
0,9128	0,317485	228,6	229,9	229,25	0,919238816	0,65
1,1128	0,383874	228	229,1	228,55	0,777817459	0,55

T1, zprůměrovány hodnoty z měření v blízkosti povrchu ze strany A a B (mimo normu)

x [mm]	h [mm]	Průměr	Směrodatná odchylka	Standardní chyba
0,06	0,02159	262	0	0
0,08	0,028765	251	2,239171474	1,583333333
0,1	0,035928	256	6,481812161	4,583333333
0,13	0,046652	251	8,131727984	5,75