



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ
Katedra biomedicínské techniky

Měření a hodnocení tvrdosti povrchu

Measurement and evaluation of surface hardness

Bakalářská práce

Studijní program: Biomedicínská a klinická technika

Studijní obor: Biomedicínský technik

Autor bakalářské práce: Anna Medvedovska

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Patrik Kutílek, Ph.D

Kladno 2017

Zadání bakalářské práce

Student: **Anna Medvedovska**
Obor: Biomedicínský technik
Téma: **Měření a hodnocení tvrdosti povrchu**
Téma anglicky: Measurement and evaluation of surface hardness

Zásady pro vypracování:

Navrhněte a experimentálně ověřte metodiku měření tvrdosti povrchů různých protetických materiálů systémem Revetest Xpress. Pro tento účel navrhněte a implementujte aplikaci v programovém prostředí MATLAB. Provedte analýzu a návrh vhodných metod měření a výpočtu tvrdostí a též přepočtu různých parametrů tvrdostí. Výsledky měření statisticky vyhodnoťte. Vytvořte návod a metodiku použití vámi vytvořené aplikace.

Seznam odborné literatury:

- [1] Daniel M., Experimentální biomechanika, ed. skripta, ČVUT, 2008, ISBN 9788001039823
- [2] Soumarová Alena, Nové metody hodnocení vlastností a kvality tenkých vrstev pro biomedicínu, 2012
- [3] Kutílek P., The procedure of evaluating the practical adhesion strength of new biocompatible nano-and micro-thin films in accordance with international standards, Acta of Bioengineering and Biomechanics, ročník 13, číslo 3, 2011

Zadání platné do: 11.09.2018

Vedoucí: doc. Ing. Patrik Kutílek, M.Sc., Ph.D.

.....
vedoucí katedry / pracoviště

.....
děkan

V Kladně dne 20.02.2017

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem „Měření a hodnocení tvrdosti povrchu“ vypracovala samostatně a použila k tomu úplný výčet citací použitých pramenů, které uvádím v seznamu přiloženém k diplomové práci.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů.

V Kladně

.....

Anna Medvedovska

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala vedoucímu práce doc. Ing. Patrik Kutílek, Ph.D. za cenné připomínky a odborné vedení bakalářské práce.

ABSTRAKT

Měření a hodnocení tvrdosti povrchu

Tvrdot je jedná ze základních charakteristik, která popisuje povrchové vlastnosti materiálu. Existují mnoho specializovaných systémů pro měření tvrdosti. Ale pro měření tvrdosti se také dají použít univerzální systémy pro měření komplexních vlastností povrchů. Příkladem takových systémů je přístroj pro měření adheze vrstev povrchů Revetest Xpress. Cílem této práce bylo navrhnout metodu měření tvrdosti povrchu různých materiálu používaných v protetice a experimentálně ji ověřit pomocí systému Revetest Xpress. Na základě této metody je vytvořen software, který umožňuje na základě rozměrových parametrů otisku vnikajícího tělíska a parametrů jeho zatížení určit tvrdost povrchu testovaného materiálu. Navržený softare byl aplikován pro hodnocení tvrdosti vybraných materiálů využitím univerzálního systému pro měření povrchových vlastností materiálů. Předpokladem je využití navržených metod a SW pro hodnocení povrchových vlastností nejen protetických náhrad, ale i dalších zdravotnických nástrojů a výrobků.

Klíčová slova

Tvrdot, Rockwell, zkouška, tenká vrstva

ABSTRACT

Measurement and evaluation of surface hardness

Hardness is one of the main characteristics, which describes surface material properties. There are many special systems to measure hardness. But for hardness measurement, you can use a universal system for measurement of complex surface properties. As an illustration of this systems could serve a device for surface adhesion measurement - Revetest Xpress. The purpose of the assignment is to propose a method of surface hardness measurement of different materials which are used in prosthetics and make an experimental test by using Revetes Xpress. Fingerprint dimensional parameters and it's load parameters created on a current method software, enable to define surface hardness of tested material. The designed software was applied for estimation of chosen materials by using universal material measurement system of surface properties. Among possible applications of designed methods and software for surface properties estimation is not only prosthetic replacements but other health environment.

Keywords

Hardness, Rockwell, test, thin layer

Obsah

Obsah.....	
Seznam symbolu a zkratek.....	3
Úvod.....	5
1. Teoretická část.....	6
1.1 Rešeršní část.....	6
1.1.1 Úvod do metod měření tvrdosti.....	6
1.1.2 Statické zkoušky.....	6
1.1.3 Rozdělení zkoušek podle používaných intendorů a standardy měření.....	7
1.1.4 Systémy pro statické zkoušky.....	17
1.2 Systémy používané na FBMI v Kladně.....	19
1.2.1 Systém Revetest xpress.....	19
1.3 Závěr kapitoly.....	19
2. Praktická část.....	21
2.1 Návrh metody určení tvrdosti.....	21
2.1.1 Návrh výpočtu tvrdosti dle dat ze systému Revetest xpress.....	21
2.1.2 Závěr kapitoly.....	24
2.2 Návrh metodiky měření tvrdosti systémem Revetest xpress.....	24
2.2.1 Princip měření systémem Revetest xpress.....	25
2.2.2 Vyhodnocení dat z testu systémem Revetest Xpress.....	26
2.2.3 Konverze získaných dat mezi metodami měření tvrdosti.....	29
2.2.4 Závěr kapitoly.....	30
2.3 Návrh a úprava software pro měření tvrdosti.....	30
2.3.1 Návrh uživatelského rozhraní.....	31
2.3.2 Návrh algoritmů výpočtu tvrdosti.....	31
2.3.3 Návrh algoritmů konverze.....	32
2.3.4 Závěr kapitoly.....	34

2.4 Aplikace navržené metody a postupů.....	34
2.4.1 Testované vzorky.....	34
2.4.2 Zhodnocení výsledků testovaných vzorků.....	35
3. Diskuse.....	43
4. Závěr.....	44
4.1 Naplnění cílů práce.....	45
4.2 Perspektivy dalšího využití navržených metod a postupů.....	45
Přehled použité literatury.....	46
Přílohy.....	47
Příloha 6: Návodů pro měření tvrdosti systémem Revetest Xpress.....	69

Seznam symbolů a zkratk

Seznam symbolů

Symbol	Jednotka	Význam
F	[N]	Síla
h	[mm]	Hloubka otisku
A, M	[mm ²]	Plocha otisku
D	[mm]	Průměr indentora (koule)
d	[mm]	Průměr otisku
P	[N]	Zatížení
d ₁	[mm]	Diagonála otisku
l	[mm]	Délka úhlopříčky otisku
α	[°]	Vrcholový úhel
r_l	[mm]	Změřený poloměr otisku
r_2	[mm]	Změřený poloměr otisku
r_k	[mm]	Kritický poloměr otisku
h_l	[mm]	Změřená hloubka pro r_l
h_k	[mm]	Hloubka pro r_k

h_t [mm] Hloubka chyby

h_2 [mm] Změřená hloubka pro r_2

Seznam zkratek

Zkratka	Význam
SW	Software
HW	Hardware
LVDT	(linear variable differential transformer) elektrický převodník používaný k měření lineárního posuvu
USB	(Universal Serial Bus) je univerzální sériová sběrnice
HR 15N	Tvrдост podle Rockwella škála 15N
HV	Tvrдост podle Vickerse
HB	Tvrдост podle Brinella
HK	Tvrдост podle Knoopu
HL	Tvrдост podle Leeby
HS	Tvrдост podle Shore
AMU	(Atomic Mass Units)

Úvod

Vývoj v oblasti měřicí techniky pro měření materiálových vlastností přinesl v posledních letech nové možnosti měření a vyhodnocování tvrdosti. Obecně by se dalo říct, že tyto nové metody jsou vylepšením standardních metod měření, které jsou známy již léta, ale měření je automatizováno. Vylepšení se týkají především provedení přístrojů, které mohou být nyní mnohem jednodušší s vysokou přesností měření a následným okamžitým automatizovaným vyhodnocením měření. Jedním ze základních systémů jsou tzv. tvrdoměry pro měření povrchových vlastností materiálů, a to i pro medicínské aplikace.

Tvrdomost materiálu je chápána jako schopnost materiálů odolávat deformaci a zničení povrchové vrstvy. Měření tvrdosti je jedním ze způsobů vyzkoušení různých materiálů. Zkoušky tvrdosti jsou používány v laboratořích a továrnách pro zjištění charakteristik mechanických vlastností kovových a nekovových materiálů. Tvrdomost se nejčastěji měří podle vlivu na povrch materiálu indentorem z pevného materiálu (kalená ocel, diamant atd.). Indentor je ve tvaru koule, kužele, jehlanu. Podle charakteru působení indentora se rozlišuje několik metod výpočtu tvrdosti, jejíž měření se řídí národními či mezinárodními standardy.

Pro měření a výpočet tvrdosti je možné využít systémů, které poskytují informaci o tvrdosti v rámci různých škál hodnocení, nebo je nutné, pokud je potřeba, provádět přepočty. Obvykle systémy měří tvrdost v rámci omezeného počtu škál tvrdosti, přičemž je nutné dodržet při měření podmínky měření daných normami měření. První motivací práce je tudíž navrhnout metodu přepočtů hodnot tvrdostí tak, aby mohlo být prováděno srovnávání hodnot resp. výsledků měření tvrdostí materiálů pro medicínské aplikace.

Pro měření tvrdosti je možné použít systémy nejen speciálně určené pro měření tvrdosti, ale univerzálnějších pro měření komplexních vlastností povrchů. Jedná se například o systémy měření praktické adheze povrchu tenkých vrstev s možností měření tvrdosti tenkých vrstev. Tyto systémy mají však ještě menší možnosti měření a hodnocení tvrdosti a přepočtu hodnot mezi škálami tvrdosti. Využití vhodného software pro přepočty hodnot tvrdostí by tak vedlo ke zvýšení využití takovýchto systémů. Přitom tyto systémy mají většinou ještě jedno podstatné omezení, a sice to, že přídavná zařízení umožňující schopnost měření povrchových vlastností jsou finančně nákladná. Jedná se například o systémy měření adheze povrchu, používající stejných indentorů jako pro měření tvrdosti, ale neumožňující v základních verzích poskytnout informaci pro výpočet parametrů tvrdosti.

Cílem práce je tudíž nejen návrh SW pro přepočty hodnot tvrdostí v rámci různých škál tvrdosti, ale uvedený SW aplikovat pro hodnocení tvrdosti univerzálními systémy s omezenými možnostmi měření tvrdosti. Konkrétně se bude jednat o systém pření vrypem, jenž je založen na hodnocení adheze opticky. Navržením metodiky a metod by však bylo možné systémem měřit i tvrdost povrchu ve specifických případech. Mohlo by tak dojít ke snížení finančních nákladů na pořízení nového HW a SW pro určení hodnot tvrdosti povrchů.

1. Teoretická část

1.1 Rešeršní část

Vývoj měření tvrdosti materiálů zažilo velký rozvoj v první polovině 20. století. Měření relativní tvrdosti hloubky průniku indenteru bylo navrženo v roce 1908 podle vídeňského profesora Ludwiga v knize „Die Kegelprobe“. V tomto období vznikly metody, které jsou dodnes hodně používané, například metody podle Vickerse, Brinella nebo Rockwella. V současnosti vznikají moderní způsoby měření, které vychází právě z metod vzniklých ve zmíněném období. Nové typy mechanických zkoušek již nejsou spojeny se zničením kovu, navíc ve většině případů nevyžadují žádnou zvláštní přípravu vzorku. [1]

Dnes můžeme všechny metody pro měření tvrdosti v závislosti na dočasně povaze zatížení a měření odporu rozdělit do tří skupin v závislosti na pohybu tělíška: statické, dynamické a kinetické. Nejběžnější jsou statické metody, ve kterých je zatížení postupně aplikované na indenter, čas pod zatížením se řídí normami pro vhodné škály tvrdosti. Tyto metody určují kvalitu materiálů, schopnost jejich použití v různých směrech a pro různé provozní podmínky, [3]. V dalších částech se budu věnovat podstatě metod měření tvrdosti se zaměřením na statické zkoušky a jejich příp. využití na FBMI ČVUT.

1.1.1 Úvod do metod měření tvrdosti

Byl vytvořen velký počet metod pro měření tvrdosti, které jsou obvykle založeny na tom, že ve zkušební materiál je vtlačen indenter. Míra trvalé deformace materiálu je považována za měřítko jeho tvrdosti. Čím větší odolnost proti plastické deformaci materiálu, tím vyšší je tvrdost. Materiál je plasticky deformován v důsledku toho, že je přiloženo dostatečně velké zatížení na povrchové vrstvy materiálu pod indentorem a v jeho blízkosti. Po odstranění zátěže na povrchu zkušebního materiálu vzniká otisk. Experimentálně lze určit tvrdost statickými a dynamickými metodami.

Testy na tvrdost a mikrotvrdost pokrývají prakticky neomezenou škálu materiálů od velmi měkkých (například grafit) do ultra tvrdých (diamant, karbidy atd.) Metody měření tvrdosti lze rozdělit podle více kritérií [3]:

1. Podle principu zkoušky na vtiskové, vrypové, odrazové a kyvadlové metody.
2. Podle rychlosti působení zatěžující síly na statické a dynamické metody.

Protože jsou nejrozšířenější statické zkoušky a realizace systémů pro takové měření je nejjednodušší, nejčastější a současně jsou pro tyto zkoušky navrženy národní a mezinárodní normy, proto se těmito zkouškami budu primárně níže věnovat.

1.1.2 Statické zkoušky

Jak již bylo uvedeno, statické zkoušky tvrdosti jsou nejrozšířenější a nejpřesnější metody pro stanovení tvrdosti materiálů. Tyto metody se liší od sebe navzájem především podle použitého typu indenteru (koule, jehlan, kužel atd.), jeho materiálu (ocel, karbid wolframu, diamant atp.), podle velikosti zatížení aplikovaného na indenter. Indenter je z pevného materiálu, který se špatně deformuje (obvykle diamant či ocel), má určitý geometrický tvar (koule, jehlan, kužel, atd.), který je vtlačen do povrchu vzorku nebo finálního produktu. Indenter je do vzorku vtlačován (vznikne vtisk), přičemž síla se plynule zvyšuje.[1] Pro vyhodnocování zkoušek se používá snímačů sil, hloubky či mikroskopů. Indenter nesmí podléhat trvalým deformacím. Musí mít co největší tvrdost a vysoký modul pružnosti v tahu. Pro materiál indenteru se volí kalená ocel, slinutý karbid nebo diamant. Kalenou ocel lze použít

pro materiály vykazující tvrdost do 450 HV. Slinutý karbid asi do tvrdosti 630 HV. Pro materiály s tvrdostí vyšší jak 630 HV lze použít pouze diamantový indentor. [1]

Ve statických tvrdoměrech je čas použití zatížení na hrot od několika sekund do jedné minuty a tvrdost je dána velikostí získaného otisku. Tvrdost můžeme stanovit pomocí různých škál - Vickers, Brinell, Shore, Rockwell. Většina měkkých materiálů je určena dle stupnice Brinella nebo Shore pro tvrdé – Rockwella a pro velmi tvrdé dle Vickerse. Také výběr stupnice je vybrán v souladu s technickou dokumentací. [4]

1.1.3 Rozdělení statických zkoušek podle používaných intendorů

Do statických metod patří následující měření tvrdosti podle

- Brinella
- Rockwella
- Vickerse
- Knoop
- Leeba

Zkouška podle Brinella

Metoda dle Brinella byla vynalezená v roce 1900 ve Švédsku. Nevýhodou této metody byla pomalá rychlost a to, že metoda není vhodná pro kalenou ocel nebo jiné tvrdé materiály. Podstata metody spočívá v tom, že koule (ocel nebo jiný tvrdý kov nebo slitina) s určitým průměrem, se silou působící kolmo na povrch vzorku, je během určité doby vtlačena do kovu. Hodnota tvrdosti je určena k měření průměru otisku po odstranění síly. [2]

Hodnota tvrdosti dle Brinella se dá počítat jako poměr síly F působící na kouli k ploše otisku.

Dle rovnice [2]:

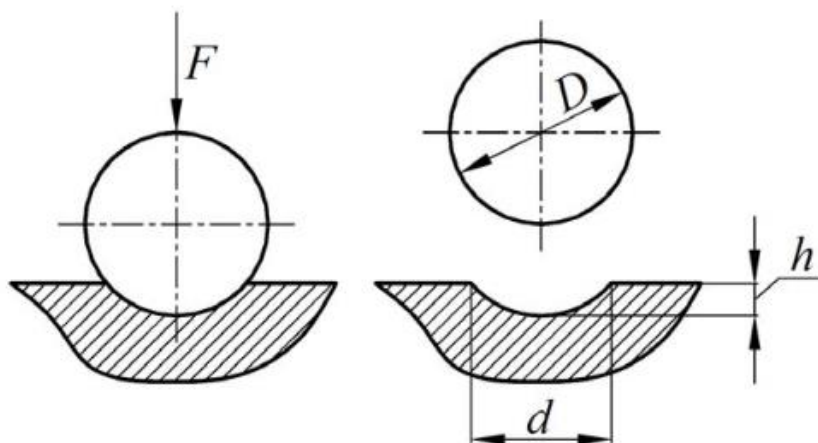
$$HB = \frac{F}{A} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1)$$

F – síla, působící na kouli [N]

A – plocha povrchu sférického otisku [mm^2]

D – průměr koule [mm]

d – průměr otisku [mm]



Obrázek 1: Měření tvrdosti pomocí Brinella, kde F je síla působící na indentor, D je průměr koule, d je průměr otisku, h je výška otisku [2]

ISO 6506-1 je obvykle nejčastěji norma, podle které provádíme měření tvrdosti pomocí Brinella. Na základě této normy musí mít kovová kulička tvrdost větší než 850 HV. Průměr koule má být 10; 5; 2,5; 2 nebo 1 mm. Níže uvádím základní podmínky měření tvrdosti podle Brinella. [14]

Síla je závislá na parametru K a průměru. Koeficient K závisí na materiálu. [2]

Tabulka 1: Zvolení parametru K v závislosti na zkoumaném materiálu [2]

Materiál	Tvrdost podle Brinella	K
Ocel, litina, tvárné materiály (na bázi niklu, kobaltu a další)	< 140	10
	>140	30
Tinan a jeho slitiny	>50	15
Měď a slitiny na jeho základě, lehké kovy a jejich slitiny	<35	5
	>35	10
Babbitt	od 8 do 50	25
Olovo, cín a ostatní měkké kovy	< 20	1

Tabulka 2: Závislost síly na průměru a K [2]

Průměr kuličky d(mm)	Síla F(N) pro K					
	30	15	10	5	2.5	1
1	294,2	-	98,07	49,03	24,52	9,807
2	1177	-	392,3	196,1	98,07	39,23
2,5	1839	-	612,9	306	153	60,8
5	7355	-	2452	1226	612,9	245,2
10	29420	14710	9807	4903	2452	98,7

Tabulka 3: Čas zatížení v závislosti na tvrdosti [2]

Tvrdość podle Brinella	Čas zatížení (s)
< 10	180
10 – 35	120
35 -100	30
100	10-15

Zkouška podle Vickerse

Při testování tvrdosti podle Vickerse se do povrchu materiálu zatlačí diamantový čtyřstranný jehlan s vrcholovým úhlem $\alpha=136^\circ$. Po odstranění zatížení se měří diagonála otisku. Číslo HV se vypočítá jako poměr zatížení k ploše otisku jehlanu.[2]

Rovnice [2]:

$$HV = \frac{P}{M} = \frac{2 \cdot P \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{d_1^2} = 1.854 \cdot \frac{P}{d_1^2} \quad (2)$$

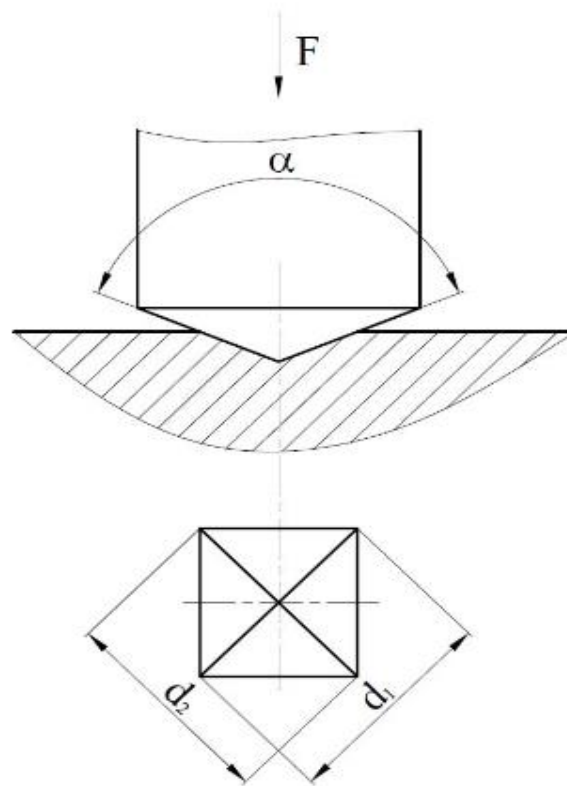
kde

P – zatížení [N]

M – plocha otisku jehlanu [mm²]

d₁ – diagonála otisku [mm]

Výhodou Vickersovy metody ve srovnání s metodou Brinella je to, že touto metodou můžeme testovat materiály vyšší tvrdosti v důsledku použití diamantového jehlanu.



Obrázek 2: Měření tvrdosti pomocí Vickerse, kde F je síla působící na indentor, d_1, d_2 jsou diagonály otisku [2]

ISO 6507-1 je norma, podle které obvykle nejčastěji provádíme měření tvrdosti pomocí Vickerse. Podle normy tuto zkoušku provádíme při teplotě 20°C ($\pm 10^{\circ}$). Čas zatížení má být 10–15 s. Při měření tvrdosti diamantovou pyramidou se používají zatížení: 9,807; 19,61; 24,52; 29,42; 49,03; 98,07; 196,1; 294,2; 490,3; 980,7 N. [10]

Zkouška podle Knoop

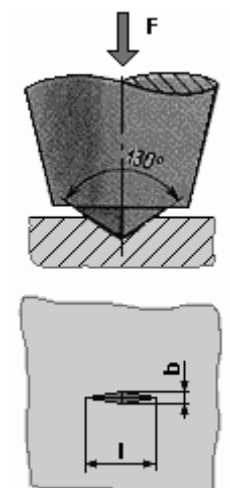
Metodou měření podle Knoop se dají měřit také nanovrstvy, které jsou nanesené na zkušební materiál. Měření se provádí čtyřbokým diamantovým jehlanem, který je pod zatížením vtačen do povrchu s určitou silou. [15]

$$HK = \frac{1,4509 \cdot F}{l^2} \quad (3)$$

kde

F – zatížení (působící síla) [N]

l – délka delší úhlopříčky otisku [mm]



Obrázek 3: Měření tvrdosti pomocí Knoopa, kde F je síla působící na indentor,
d je šířka otisku, l je délka otisku [2]

ISO 4545-2 je obvykle norma, podle které provádíme měření tvrdosti pomocí Knoopa. Podle normy tuto zkoušku provádíme při teplotě 23 °C (± 5 °). Čas zatížení má být 8–12 s. Rychlost aplikace síly by měla být v rozmezí od 15 do 70 $\mu\text{m/s}$. [15]

Tabulka 4: Doporučené zkušební zatížení pro provádění zkoušek [15]

Název stupnice tvrdosti	Nominální hodnota zatížení	
	Síla, H	Přibližný ekvivalent, kp
HK 0,010	0,09807	0,010
HK 0,020	0,19610	0,020
HK 0,025	0,24520	0,020
HK 0,050	0,49030	0,050
HK 0,100	0,98070	0,100
HK 0,200	1,96100	0,200
HK 0,300	2,94200	0,300
HK 0,500	4,90300	0,500
HK 1,000	9,80700	1,000
HK 2,000	19,6140	2,000

Zkouška podle Rockwella

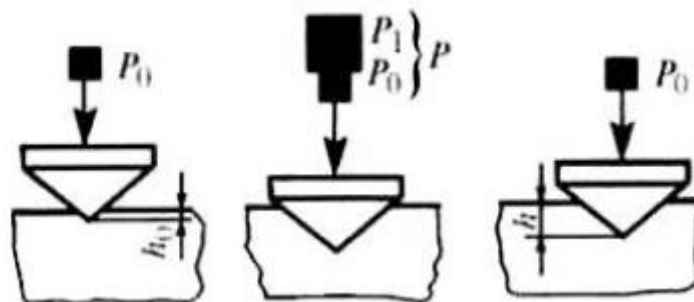
Rockwellův přístroj měření tvrdosti, vynalezený kolem roku 1914, je pravděpodobně nejčastější systém pro měření tvrdosti, sloužící k určení relativní hloubky. [12] Potřeba tohoto přístroje byla způsobena nutností rychle určit účinky tepelného zpracování na ocelové kleci ložisek. Jednoduchost Rockwellovy metody vedla k jejímu rozšířenému použití v průmyslu pro testování tvrdosti. Tento způsob měření tvrdosti je nejuniverzálnější a nejméně náročný. Tvrdost závisí na hloubce zářezu špičkou, pro který se použije diamantový kužel s vrcholovým úhlem 120° anebo ocelová kulička o průměru 1,588 mm. [9] Zatížení je vybráno v závislosti na typu materiálu. Pro různé kombinace zatížení a typů indentoru používáme několik měřicích stupnic. Tvrdost podle Rockwella představují čísla, která určují úroveň tvrdosti, a písmena HR s uvedením stupnice tvrdosti, například: 70HRA, 58HRC, 50HRB, 43HR15N.[2]

Škála A (hrot – diamantový kužel, celkové zatížení 600 N). Toto měřítko se používá pro velmi tvrdé materiály, pro tenké plošné materiály nebo tenké (0,5 - 1,0 mm) vrstvy. Měření se značí HRA. Měření tvrdosti je omezeno rozsahem 70–85. [2]

Škála B (hrot – ocelová koule, celkové zatížení 1000 N). Toto měřítko se používá pro poměrně měkké materiály (<400 NV). Měření tvrdosti je omezeno rozsahem 25–100. Hodnoty tvrdosti podle Rockwella nemají přesné vztahy s hodnotami tvrdosti podle Brinella a Vickerse. [2]

Škála C (hrot – diamantový kužel, celkové zatížení 1500 N.). Toto měřítko se používá pro pevné materiály (> 450 HB), jako je například kalená ocel. Měření se značí HRC. Měření tvrdosti je omezeno rozsahem 20–67. [2]

Škála 15N (hrot – diamantový kužel, celkové zatížení 147,1 N.). Toto měřítko se používá pro nanotenké vrstvy. Měření se značí HR15N. Měření tvrdosti je omezeno rozsahem 69–93. [2]



Obrázek 4: Měření tvrdosti pomocí Rockwella, kde P_0 , P_1 jsou zatížení působící na indentor, h je hloubka otisku [4]

Rockwell C

Tato zkouška má dva typy testu, regulární a super test. [2]

Regulární test se používá pro plasty a měkké kovy. Super test se používá pro tvrdé materiály.

Obecně je tvrdost podle Rockwella dána vztahem [9]:

$$HR = N - \frac{h}{S} \quad (4)$$

HR – Hard Rockwell test

N – hodnota z tabulky Rockwella. V našem případě to bude hodnota 100, která se používá v testech s diamantovým hrotem pro škály: A, C, D, 15 N, 30 N, 45 N, 15 T, 30 T, 45 T. (viz. příloha 1)

h – hloubka otisku [mm]

S – hodnota Rockwellovy míry pro škály A, B, C, D, E, F, G, H, K (viz. příloha 2) v míře 0.002 mm [9]

Regulární test Rockwella [9]:

$$HR = 100 - \frac{h}{0.002 \text{ mm}} \quad (5)$$

HR – Hard Rockwell test

h – hloubka otisku [mm]

Super test Rockwella se používá pro tvrdé kovy. Zkouška se provádí pro škály HR15N, HR30N, HR45N (viz příloha 1) [9]:

$$HR = 100 - \frac{h}{0.001 \text{ mm}} \quad (6)$$

HR – Hard Rockwell test

h – hloubka otisku [mm]

Protože se veškerá měření provádí podle norem a zkouška podle Rockwella je nejdůležitější, rozeberu podrobněji normu ISO6508, která mi umožňuje měření tvrdosti.

ISO 6508 [9]

Zkušební materiál: zkouška se provádí na hladkém povrchu, který nemá nečistoty a oleje, pokud není jinak uvedeno ve standardu na výrobu. Výjimkou jsou kovy jako například titan, které se mohou lepit na indentor. [9]

Zkoušky: zkoušky jsou prováděny při teplotě v rozmezí 10–35 °C. Protože má teplota vliv na průběh zkoušky, je doporučeno využívat menší rozmezí teploty. Před sadou měření, nebo pokud od posledního měření už proběhlo 24 hodin, stejně jako po každém odstranění nebo nahrazení indentora se kontroluje, že indentor je správně instalován. První dvě měření po změně neberou v úvahu. [9]

Průběh měření: Předzátížení má trvat 3 s. Nárůst síly do maximální hodnoty má trvat od 1 do 8 s. Celkové zatížení musí být udřeno 4 ± 2 s. Jestli je pro materiál potřeba udržovat celkové zatížení víc než 6 s, které jsou uvedené v normě, je třeba, aby to bylo uvedeno v technických předpisech pro výrobu. V takových případech má být v protokolu provedení zkoušky uvedeno, o kolik byl zvýšen čas celkového zatížení. Vzdálenost mezi středy dvou sousedních otisků by měla být více než čtyři průměry otisku (ale méně než 2 mm). [9] Vzdálenost středu jakýchkoliv otisků od okraje materiálu by měla být nejméně dva a půl průměru otisku (ne však méně než 1 mm). [9]

Protokol zkoušky má obsahovat [9]:

- 1) Odkaz na tento certifikát;
- 2) Označení testovaného vzorku;
- 3) Teplotu zkoušky, jestli teplota není v rozmezí 10–35 °C;
- 4) Výsledek zkoušky;
- 5) Dodatečné požadavky v rozsahu standardu;
- 6) Podrobnosti o událostech, které by mohly ovlivnit výsledky pokusu;
- 7) Skutečné trvání celkového zatížení, které působí déle než 6 sekund, než je povoleno standardem;

Změny, které využívají pro hodnoty tvrdosti podle Rockwella získané z konvexní válcové ploše, uvedené v tabulce. [9]

Tabulka 5: Měření tvrdosti diamantový kónickým indentorem (škály A, C, D) [9]

Hodnoty tvrdosti podle Rockwella	Poloměr zakřivení, mm								
	3	5	6,5	8	9,5	11	12,5	16	19
20	-	-	-	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0
25	-	-	3,0	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
30	-	-	2,5	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5
35	-	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
40	-	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5
45	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
50	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5
55	2,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0
60	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
65	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
70	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
75	1,0	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0
80	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0	0	0	0	0	0
90	0,5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabulka 6: Měření tvrdosti diamantovým kónickým indentorem (škála N)^{a,b} [9]

Hodnoty tvrdosti podle Rockwella	Poloměr zakřivení, mm					
	1,6	3,2	5	6,5	9,5	12,5
20	1,6	3,2	5	6,5	9,5	12,5
25	(5,5) ^d	3,0	2,0	1,5	1,5	1,0
30	(5,5) ^d	3,0	2,0	1,5	1,0	1,0
35	(5,0) ^d	2,5	2,0	1,5	1,0	1,0
40	(4,5) ^d	2,5	1,5	1,5	1,0	1,0
45	(4,0) ^d	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
50	(3,5) ^d	2,0	1,5	1,0	1,0	1,0
55	(3,5) ^d	2,0	1,5	1,0	0,5	0,5
60	3,0	1,5	1,0	1,0	0,5	0,5
65	2,5	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5
70	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,5
75	1,5	1,0	0,5	0,5	0,5	0
80	1,0	0,5	0,5	0,5	0	0
85	0,5	0,5	0,5	0,5	0	0
90	0	0	0	0	0	0

^a - tyto změny jsou přibližné, jsou to průměrné hodnoty s přesností do 0,5 jednotek tvrdosti Rockwella z mnoha hodnot tvrdosti na zakřiveném povrchu, uvedených v následující tabulce;

^b - při měření tvrdosti konvexních ploch chybu měření výrazně ovlivňuje nekompatibilita zvedacího bloku a vtlačovacího tělíska a také povrchové vady materiálu;

^c - změny v závorkách by neměly být použité, pokud není dohodnuto jinak;

Před zahájením měření tvrdosti by měly být přístroje být kontrolovány, aby se zajistilo, že jsou správně nakonfigurovány v souladu s pokyny výrobce. [9]

Musíte ověřit, zda [9]:

- 1) píst, který je připojen k indentoru, umožňuje klouzat podél vodicích kolejnic,
- 2) držák indentora je bezpečně upevněn v pístu,
- 3) testovací zatížení je aplikováno a odstraněno bez rázů a vibrací a tak, aby nemělo vliv na odečtení parametrů.

Indikátory měřicích systémů (s předem aplikovanou silou) do aplikací a po odstranění přídavných sil by se neměly lišit o více než 1,5 tvrdosti podle Rockwella (bez upevňovacího zařízení) a 0,5 jednotek tvrdosti podle Rockwella (s blokovacím zařízením). [9]

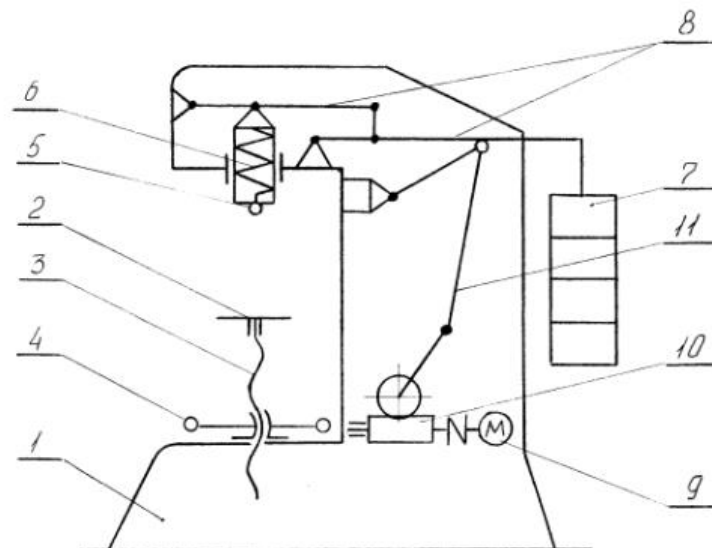
Kalibrace: Etalony mají být kalibrovány pomocí kalibračního přístroje při teplotě 23 ± 5 °C. Během kalibrace nesmí být přeměna teploty větší než 1°C. Maximální rychlost indentora má být 1mm/s. Předzátížení má trvat 3 s. Nárůst síly do maximální má trvat od 1 do 8 s. Celkové zatížení musí být udřeno 4 ± 2 s. [9]

1.1.4 Systémy pro statické zkoušky

V závislosti na velikosti a konstrukci, vlastnosti a struktuře použitého materiálu se používají stacionární, nebo přenosné tvrdoměry. Tyto tvrdoměry se liší konstrukcí a principem činnosti. Jako příklad takových systémů uvedu systémy pro měření tvrdosti podle Brinella, Vickerse a Rockwella. [11]

Zkouška podle Brinella

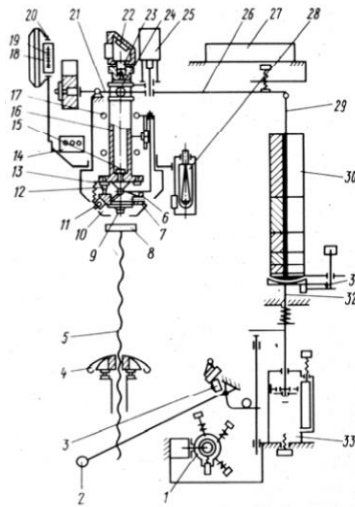
Měření tvrdosti podle Brinella lze provést pomocí systém měření tvrdosti podle Brinella.



Obrázek 5: Lis Brinella [2]

Systém pro měření podle Brinella je obvykle tvořen rámem 1, stolem 2, na který se umísťuje vzorek, setrvačníkem 3 a šroubem 4, s jehož pomocí můžeme vyzvednout vzorek do kontaktu s koulí 5 a stlačení pružiny 6. Zatížení na kouli vyrobené závažím 7 přes páky 8, který je poháněn pohybem elektromotoru 9, pomocí šnekového kola 10 a klikového mechanismu 11. [2]

Zkouška podle Vickerse

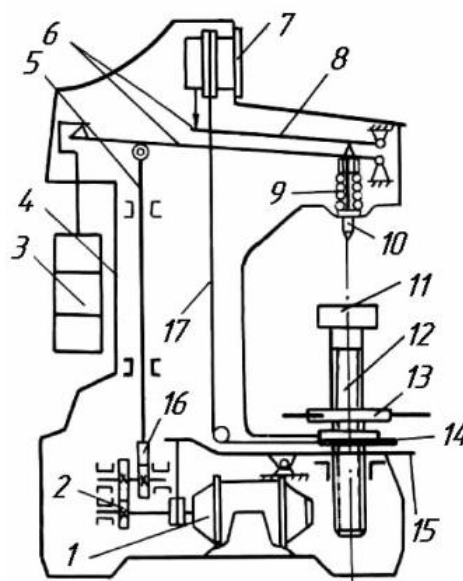


Obrázek 6: Tvrdoměr TP-7R-1 [2]

Měření tvrdosti se dá provést pomocí např. přístroje TP-7R-1. Tvrdoměr zahrnuje tyto hlavní mechanismy, které jsou upevněny uvnitř pouzdra: vřeteno 16, mikrometrická hlava 20, páka 21, závěs podvozku 29, tlumič 33, zvedací mechanismus 5 a ovládací panel 27, magnet 25, žárovka 14, rukojeť 2, mikrospínač 3. [2] Vřeteno a pákový systém jsou určeny pro vytváření a přenos zatížení na testovaný vzorek. Vřeteno je tvořeno jako trubka umístěná ve vodícím kulovém ložisku 17, na jehož spodní straně je rotující vozík 7, který nese tip 11 a čočku 9. Poloha vzniku se dá nastavit pomocí zářezek 6 a 12. Optický systém se skládá z achromatické čočky 15, okuláru 23, zrcadla 22 a objektivu 9. Vřeteno je spojeno s pákou 26 pomocí ložisek 24. Sada nákladu 30. Zkušební materiál umísťují na stůl 8. [2]

Zkouška podle Rockwella

Systém pro měření tvrdosti je uveden na obr. 7



Obrázek 7: Tvrdoměr Rockwellův [2]

Systém pro měření tvrdosti je složen z těchto funkčních prvků: Mechanismus 14 stolu 11 se skládá ze šroubu 12 a setrvačnicku 13. Zkouška se provádí pomocí mechanismu vniku, který je poháněn elektrickým motorem 1. Z motoru se prostřednictvím šnekového kola 2 rotace přenáší vačkové jednotce 16, který pomocí tyče 5 páky 6 přenáší dolů se zátěží 3 a přenáší zatížení přes hrot 10 s míčem nebo diamantovým kuželem na konci. Zapnutí motoru provádíme pomocí pedálu 15 a vypnutí pomocí tlačítka 4. Stanovení hloubky průniku hrotu do vzorku je prováděno indikátorem 7, který je poháněn pákou 8. Přesného nastavení indikátoru dosáhneme setrvačnickem 14, který se řídí měřítkem indikátoru pomocí kabelu 17. [2]

1.2 Systémy používané na FBMI v Kladně

V laboratoři FBMI v Kladně máme k dispozici přístroj pro měření adheze povrchu vrypovou zkouškou, který by mohl s ohledem na použitý indentora umožnit statické měření tvrdosti podle Rockwella. Systém nazvaný Revetest Xpress je od společnosti CSM. K CSM scratch testeru je dodáván software Scratch 4.51 od firmy CSM Instruments, speciální USB flash klíče a mikroskop od firmy Dino-Lite. Tento SW umožňuje nastavit podmínky měření jako rychlost zatěžování hrotu, rychlost pohybu hrotu, hodnotu předzatížení atp. Uvedené je možné po nastavení v souladu se standardy měření tvrdosti využít pro měření tvrdosti podle Rockwella.

1.2.1 Systém Revetest xpress

Testery společnosti CSM pro stanovení tvrdosti scretch metodou jsou ideální přístroje pro popis povrchových mechanických vlastností tenkých vrstev a povlaků, jako např. adheze, destrukce a deformace. Systémy mohou být použity pro zkoumání všech typů průmyslových nátěrů od vrstev s plazmovým obrábění, které jsou používány v polovodičových a optických technologiích, po dekorativní a ochranné nátěry, které jsou používány v automobilovém průmyslu. Schopnost zařízení pro stanovení adheze škrábáním určuje vlastnosti systému „film - substrát“ a měřitelné parametry, jako jsou třecí síly a pevnosti adheze s použitím celé řady dalších metod, takže je cenným nástrojem pro výzkum a kontrolu kvality. Způsob zahrnuje vytvoření otisku diamantovým hrotem na zkušební vzorku. Indentor, který je vyroben z diamantu, se provádí na potažený povrch s použitím konstantního zatížení, které se zvyšuje postupně, nebo etapově. Při určitém zatížení, které se nazývá kritické, se krycí vrstva začne ničit. Kritické zatížení se dá určit velmi přesně pomocí mikroskopu opticky nebo pomocí akustického senzoru (MST a RST), který je připojen k nosnému ramenu spolu s optickým mikroskopem. Kritické zatížení se používá pro kvantifikaci adhezních vlastností různých kombinací filmů a substrátů. Kromě akustické emise může tvrdoměr měřit zatížení, tangenciální třecí sílu a hloubky průniku. Kromě akustické emise může tvrdoměr měřit zatížení, tangenciální třecí sílu a hloubky průniku. Jak je z uvedeného zřejmé, nabízí se možnost modifikace systému pro měření tvrdosti tenkých vrstev a substrátu. [7]

1.3 Závěr kapitoly

Tvrdot je jednou z nejpoužívanějších vlastností pevných látek. Prakticky ve všech zdrojích je tvrdost určena jako „schopnost materiálu odolávat vniku tělesa s větší tvrdostí“. Základem měření tvrdosti je analýza interakcí jehlanu, kužele či kuličky s povrchem materiálu. Tento typ testování je rozšířen v průmyslu. S ohledem na výše uvedené se nabízí možnost měření tvrdosti systémem Revetest Xpress původně určeným pro měření adheze. Modifikací podmínek měření můžeme provést zkoušku tvrdosti a vhodným softwarem a metodikou určit míru tvrdosti měřeného povrchu. S ohledem na možnosti systému Revetest Xpress budeme

v této bakalářské práci používat Rockwellovu metodu. Tato práce je zaměřena na využití zkoušky tvrdosti s diamantovým hrotem (škála C, Rockwell). Zkouška nevyžaduje vysokou čistotu povrchu měřeného materiálu. Nevýhodou Rockwellovy metody je menší přesnost než zkouška podle metod Brinella a Vickerse. Existuje korelace mezi hodnotami tvrdosti měřenými různými způsoby tak, že konečný výsledek můžeme dostat v hodnotě, kterou chceme, a mezi škálami tvrdosti provádět přepočty. Metoda umožňuje měřit materiály měkké i tvrdé.

Cílem této práce je navrhnout a pomocí praktického experimentu ověřit metodiku měření tvrdosti povrchů materiálu systémem Revetest Xpress a vytvořit SW tak, aby umožňoval určit tvrdost jak základního materiálu, tak i tenkých vrstev nanesených na základním materiálu.

2. Praktická část

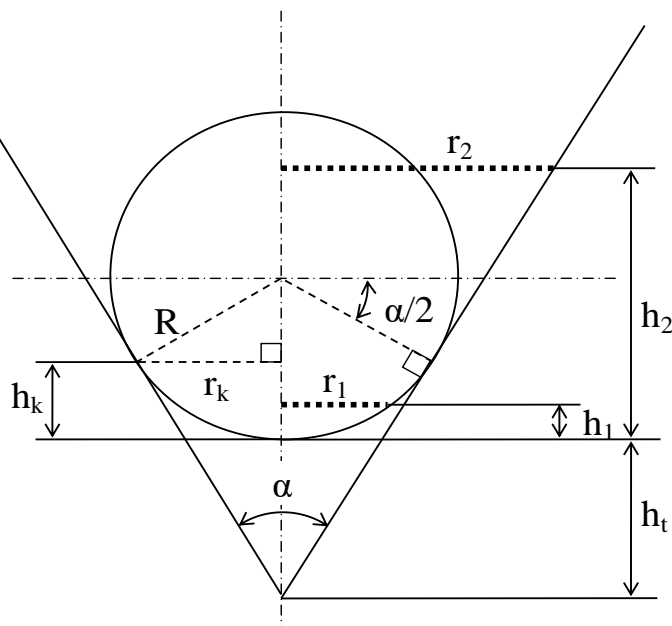
2.1 Návrh metody určení tvrdosti

Stupnice indukující tvrdost materiálů byla prvně použita v roce 1919. Stupnice nemá žádné jednotky. Symbol HR indikuje jedno z několika možných měřítek. Například „HR 15N 64“ znamená hodnotu 64 na stupnici Rockwell 15N. Čísla tvrdosti podle Rockwella se obvykle používají k popisu tvrdosti kovů, i když je lze také použít pro některé plasty.[5]

Obdobně jako stupnice tvrdosti podle Brinella je stupnice dle Rockwella založena na měření hloubky vtlačeného diamantového hrotu nebo kuličky do materiálu. Na rozdíl od testu podle Brinella obsahuje test Rockwella doporučeně dvě měření hloubky. Indentor se uvede do styku s materiálem, který má být testován. Předběžná síla je aplikována podle nastavení. [11] Po skončení předzatížení se změří hloubka otisku. Síla se bude zvyšovat s nastavenou rychlostí, dokud nedosáhne celkové síly. Tato síla se udržuje konstantní na předem určenou dobu, po jejímž uplynutí je síla snížena na první úroveň síly, tj. na předzatížení. Po uplynutí předem definované doby se hloubka otisku někdy měří podruhé. Obvykle se celý proces provádí pomocí automatických strojů. [2]

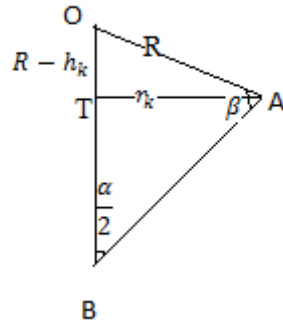
2.1.1 Návrh výpočtu tvrdosti dle dat ze systému Revetest xpress

Pomocí Revtest Xpress můžeme určovat tvrdost jak měkkých, tak i tvrdých kovů. Vniknutí indentoru do zkušebního materiálu může být buď kuličkou, nebo kuzelem, neboť předpokládáme zakončení jehklanu zaoblením tvaru kuličky s poloměrem 0,2 mm. Pro každý případ velikosti otisku resp. aplikované části vnikajícího tělíska musíme spočítat hloubku jiným způsobem. Protože do tvrdších kovů se indentor ponoří za předpokladu stejné maximální síly jen zaobleným koncem, do tvrdších materiálů se ponoří kuželovitá část hrotu. Na obrázku 8 jsem vytvořila náčrt diamantového hrotu a odvodila vztahy pro výpočet hloubky otisku ze znalosti velikosti otisku.



Obrázek 8: Náčrt diamantového hrotu

$$r_k = \frac{\sum_{i=1}^n d_{ki}}{2 \cdot n}, \quad r_l = \frac{\sum_{i=1}^n d_{li}}{2 \cdot n}, \quad r_2 = \frac{\sum_{i=1}^n d_{2i}}{2 \cdot n} \quad (7)$$



Obrázek 9: Pomocný nákres přepočtu hloubky z průměru otisku

$$\begin{aligned} \angle \beta &= 90^\circ \\ \angle \alpha &= 120^\circ \end{aligned}$$

Pro výpočet hloubky průniku indentora musíme od poloměru R odečíst kousek OT , který se rovná

$$OT = OA \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (8)$$

Po dosazení získáme:

$$R - h_k = R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (9)$$

$$h_k = R - R \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (10)$$

$$h_k = R \cdot \left(1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)\right) \quad (11)$$

Z trojúhelníka $\triangle OTA$ pomocí Pythagorovy věty dostaneme:

$$r_k^2 + (R - h_k)^2 = R^2 \quad (12)$$

$$r_k = \sqrt{R^2 - (R - h_k)^2} \quad (13)$$

Jestliže $r_l < r_k$

$$(R - h_1)^2 + r_1^2 = R^2 \quad (14)$$

$$(R - h_1)^2 = R^2 - r_1^2 \quad (15)$$

$$R - h_1 = \sqrt{R^2 - r_1^2} \quad (16)$$

$$h_1 = R - \sqrt{R^2 - r_1^2} \quad (17)$$

V druhém případě bude do zkušebního materiálu vnikat kuželová část. Zprvé musíme vypočítat výšku kužele. Část OB se rovná:

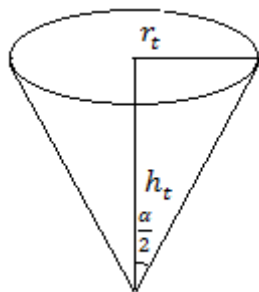
$$OB = \frac{R}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (18)$$

Pracovní hloubka hrotu se rovná:

$$h_t = OB - R \quad (19)$$

$$h_t = \frac{R}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} - R \quad (20)$$

$$h_t = R \cdot \frac{1 - \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (21)$$



Obrázek 10: Pomocný nákres výpočtu hloubky otisku

Z definice tangentu můžeme spočítat poloměr r_t

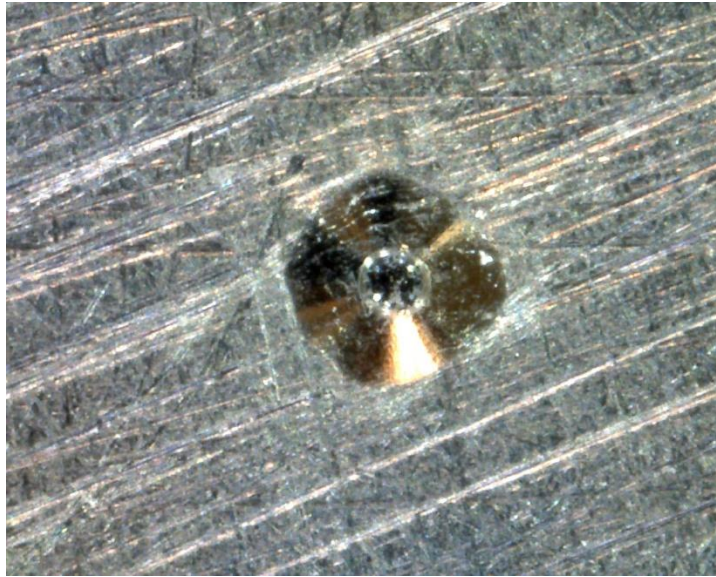
$$r_t = h_t \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad (22)$$

r_2 je výsledek pokusu.

$$h_2 = \frac{r_2 - r_t}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (23)$$

$$h_2 = \frac{r_2 - h_t \cdot \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)}{\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right)} \quad (24)$$

Na obrázku 8 je vidět rozhraní otisku koule i otisku kužele jakožto částí indentoru.



Obrázek 11: Otisk indentora na zkušebním materiálu

Pro větší přesnost se budou průměry měřit minimálně 3krát. [9] Následně bude ve výpočtech použita průměrná hodnota.

2.1.2 Závěr kapitoly

Existuje řada způsobů výpočtu tvrdosti materiálu. Navrhla jsem svůj způsob pro výpočet tvrdosti z hloubky otisku, přičemž hloubka otisku je určena z průměru otisku. Hloubka je vypočtena pomocí průměru otisku od indentoru tvaru kužele, přičemž kužel je tvořen vrcholovou částí kulovou a kuželovou částí těla indentoru. Pro případ, ve kterém do zkušebního materiálu vnikne koule, musíme hloubku vypočítat pomocí vzorečku (17). V případě, kde do testovaného materiálu vnikne kužel, použijme vzoreček (24).

2.2 Návrh metodiky měření tvrdosti systémem Revetest xpress

Pro testování mnou navrženého SW jsem použila pět zkušebních vzorků, a to nitrid titanu, ocel, hliník, titan a polymer. Prováděla jsem měření 5krát na jednom zkušebním materiálu resp. vzorku. Po provedení zkoušky jsem změřila průměry otisků minimálně 3krát pro větší přesnost výsledků.

Parametry pro měření byly zvoleny podle normy ISO 6508-1 pro test Rockwelly škály15N: předzatížení 29,42 N, maximální zatížení 147,1 N, rychlost vniku indentoru do vzorku 880 N/min. Čas zatížení jsem zvolila 6 sekund [9]. Následně byla tvrdost materiálu vypočtena pomocí vzorce uvedeného v normě [9]:

$$HR15N = 100 - \frac{h}{0,001} \quad (25)$$

kde,

h – hloubka otisku [mm]

2.2.1 Princip měření systémem Revetest xpress

Revetest xpress je automatický přístroj, který předpokládá nastavení podmínek měření v okně (obr.12). Podmínky měření je možné nastavit podle ISO norem, uvedených mnou v kap. 1.1.3. Jako rychlost pohybu hrotu, pokud bychom požadovali provádět vrypovou zkoušku, bychom nastavili ve vhodném políčku hodnotu nenulovou. V případě realizace měření tvrdosti je rychlost pohybu hrotu 0. Po nastavení podmínek měření jsou data přenesena z počítače do systému.



Obrázek 12: Ukázka volby parametrů

Data protokolu jsou přenesena přes USB kabel do Revetest Xpressu. Stiskněte tlačítko start pro zahájení testu.



Obrázek 13: Ukázka tlačítka

Jednoduchým stiskem tlačítka „start“, které se nachází na dotykovém displeji, pak přístroj začne testovací proceduru, žádné další interakce operátora nejsou potřeba. Jednotlivé části postupu měření jsou [7]:

1. Hrot (diamantový) klesne, až se dotkne povrchu vzorku. Stůl se pohybuje určitou rychlostí a zatížení povrchu vzorku způsobí otisk na povrchu vzorku.

2. Zátěž na hrot realizována pomocí elektromotoru, nejprve proběhne předzátížení a pak zatížení do předem nastavené maximální síly.
3. Aplikovaná zatížení jsou sledována pomocí siloměru. Tento snímač je připojen ve zpětné vazbě systému pro velmi přesně řízené aplikované zatížení.
4. Hloubka pronikání je sledována pomocí LVDT snímače.
5. Po provedení zatěžování se hrot vrací do výchozí polohy mimo zkušební vzorek
6. Data jsou přenesena ze systému do PC
7. Po vyjmutí vzorku proběhne vyhodnocení údajů testu používáním různých operací na počítači, nebo použijte externí mikroskop, tak jako v mém případě.

2.2.2 Vyhodnocení dat ze testu systémem Revetest Xpress

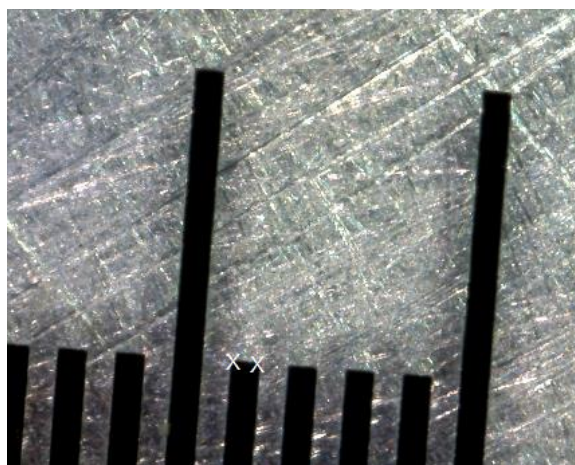
Data z testu se exportují ve dvou formátech. Nejlepší způsob je, jestliže Revetest Xpress ukáže výsledkový graf ze zkoušky, kde již bude popsáno, co se stalo se zkoušeným materiálem a jaký je výsledek. Tyto hodnoty a data již použijeme v naší další práci. Nicméně, tuto možnost nám systém používaný na FBMI ČVUT neumožňuje. Druhou variantou je, že budeme muset prohlédnout vyzkoušený materiál pod mikroskopem a analyzujeme vzorek sami, a to využitím výše uvedených a odvozených vztahů pro výpočet tvrdosti. Výsledky testů lze analyzovat v PC s dotykovým displejem připojeném do Revetest Xpress, nebo přenesením dat do soukromého počítače. [7]

Vyhodnocení materiálu lze provést v mnou vytvořeném softwaru založeném na poměru velikosti etalonu na snímku a velikosti otisku na snímku. Na začátku si musíme načíst fotografii etalonu pomocí tlačítka „Načti etalon“ (obr.14, č.1). Pak musíme určit délku etalonu pomocí tlačítka „Délka etalonu“ (obr.14, č.3). Na obrazovce vznikne kříž, kterým musíte pomocí pravého tlačítka myši vybrat odpovídající délkový dílek etalonu (ukázka na obr. 9). Pomocí přepočtu toho pak v navzájemném SW budeme moci určit průměr otisku.

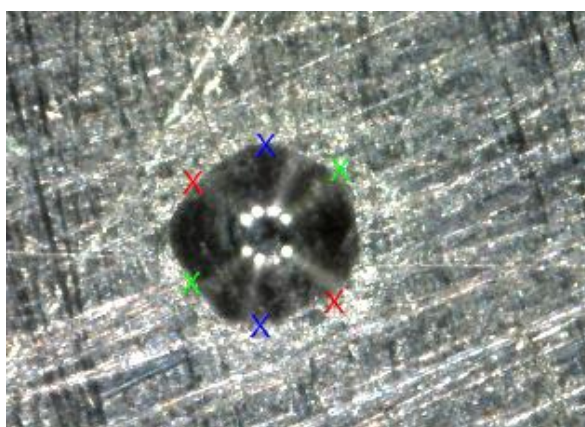
Dále, pro určení velikosti otisku, pomocí tlačítka „Načti obrázek“, (obr.14, č.2) načteme fotografii otisku. Stejným způsobem jako při určení délky etalonu určujeme hranice otisku pomocí tlačítek (obr.14, č.5) „d1“, „d2“ a „d3“ (ukázka na obr. 15). Výpočty průměru provedeme stisknutím tlačítek „Vypočti d1“, „Vypočti d2“ a „Vypočti d3“ (obr.14, č.6,7,8) pro výpočet průměru otisku. Pokud je potřeba v dalším změření průměru, lze použít blok „Dodatečné průměry“ a stejným způsobem změřit a vypočítat ještě tři průměry. Jestliže změníte počet změřených průměrů, musíte zapsat počet měření do vhodného řádku (ve výchozím nastavení je 3). Pomocí tlačítka „Průměr d“ (obr.14, č.9) můžeme vypočítat aritmetický průměr změřených průměrů otisku. Následně tlačítkem „Tvrdost“ (obr.14,č.10) spočítáme tvrdost daného zkušebního materiálu a to podle vztahu (6). Pomocí tlačítka „Směrodatná odchylka“ (obr.14,č.11) můžeme vypočítat směrodatnou odchylku průměru. Zmačknutím tlačítka „Minimální průměr“ (obr.14,č.14), SW nám ukaže hodnotu minimálního průměru. Pro výpočet tvrdosti z této hodnoty, musíme použít tlačítko níže „Tvrdost Rockwell 15N“ (obr.14,č.15). Zmačknutím tlačítka „Maximální průměr“ (obr.14,č.16), SW nám ukaže hodnotu maximálního průměru. Pro výpočet tvrdosti z této hodnoty, musíme použít tlačítko níže „Tvrdost Rockwell 15N“ (obr.14,č.17).



Obrázek 14: Umístění tlačítek



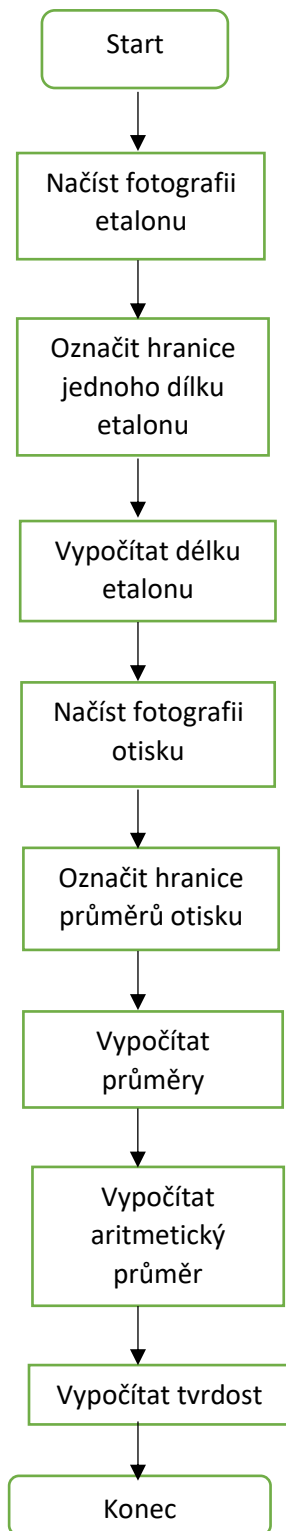
Obrázek 15: Určení délky etalonu



Obrázek 16: Určení hranic otisku

Můžeme se setkat s případy, kdy je špatně vidět otisk indentoru na zkušebním materiálu. Pomocí tlačítka „+/-“, můžeme snímek přiblížit, popřípadě oddálit. Po stisknutí „+/-“, musíme pomocí pravého tlačítka myši kliknout na zónu, kterou chceme zvětšit. Pro zmenšení obrázku existuje podobný princip. Současně se zmáčknutím pravého tlačítka myši je potřeba zmáčknout klávesu „Shift“. V levém horním rohu jsou parametry, při kterých bylo provedeno měření, které

doplníme neboť budou následně uvedeny ve výstupním protokolu z měření. Uvedla jsem předzatížení, zatížení a rychlost indentoru. Parametry se dají jednoduše měnit zmáčknutím pravého tlačítka myši a klávesy „Backspace“. Potom můžeme zadávat nové hodnoty. Na konci vyhodnocení je možné pomocí tlačítka „Save“ (obr.14,č.4)uložit protokol z měření do počítače. Postup měření je znázorněn na obrázku 17.



Obrázek 17: Blokové schéma postupu vyhodnocení dat v programu

2.2.3 Konverzace získaných dat mezi metodami měření tvrdosti

Při porovnání hodnot tvrdosti získaných různými metodami mezi sebou s mechanickými vlastnostmi materiálů je třeba si uvědomit, že v literatuře zmíněné konverzační tabulky jsou čistě empirické. Fyzikálního významu je tato konverzace zbavena, protože při vtlačování indentoru různých tvarů a velikostí a při různém zatížení je tvrdost určována při různých stavech namáhaného materiálu. I při stejném postupu měření tvrdosti je hodnota velmi závislá na zatížení: při nižších zatíženích získáme hodnoty tvrdosti vyšší.

Nicméně v některých konkrétních případech a při stejných nebo velmi podobných vlastnostech a struktuře materiálu může být takovýto převodem konverze dostatečně přesná. Přibližná konverze hodnot tvrdosti je uvedena v tabulce nebo existují odpovídající vzorce. [6] Pro Rockwellovy C hodnoty mezi -20 až 40 se Brinellova tvrdost spočítá podle

$$BHN = \frac{1.42 \cdot 10^6}{100 - HRC} \quad (12)$$

HRC – Hard Rockwell diamond cone test

BHN - Brinellova tvrdost

Pro *HRC* hodnoty větší než 40 se používá

$$BHN = \frac{2.5 \cdot 10^4}{100 - HRC} \quad (13)$$

HRC – Hard Rockwell diamond cone test

BHN - Brinellova tvrdost

Pro *HRC* platí tento vzorek

$$HRC = -\frac{2.5 \cdot 10^4}{BHN} + 100 \quad (14)$$

HRC – Hard Rockwell diamantový kuželový test

Mimo výše v normách a knihách uvedené vztahy se mohou použít konverzní tabulky. Ukázka konverzní tabulky je znázorněna v tabulce 7. Celá tabulka pro konverze je v přílohách (tab. 3).

Tabulka 7: Konverzní tabulka tvrdostí [3]

Brinell HB	Vickers HV	Rockwell HRC	Rockwell 15N	Shor	Knoop	Leeb
634	674	59	90	81	710	770
615	653	58	89	80	690	766
595	633	57	89	78	670	763
577	613	56	88	76	650	751
560	595	55	88	75	630	748
543	577	54	87	74	612	739

Pomocí tabulky jsem vyjádřila závislost mezi tvrdostí Rockwella a jinými typy tvrdosti. Podle návrhu výpočtu daného z přístroje Revetest Xpress pro tvrdost Rockwella musíme znát průměr otisku.

2.2.4 Závěr kapitoly

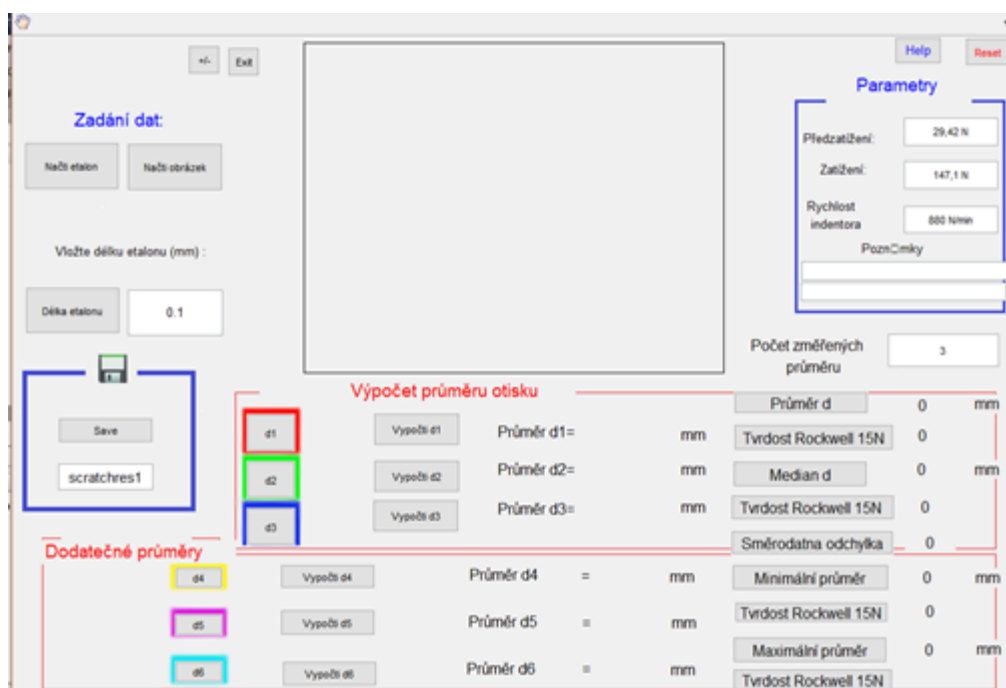
Námi použitelný Revetest Xpress přístroj, který získal mezinárodní uznání jako testovací přístroj pro materiály s tloušťkou několik mikrometrů, využiji pro měření tvrdosti a její nepřímé určení ze snímků velikosti otisku indentoru. Materiály mohou být organické nebo anorganické, magnetické a materiály pro dekorativní účely. Vytvořila jsem metodu, s jehož pomocí je možné vyhodnotit otisk na zkušebním materiálu, vytvořený přístrojem Revetest Xpress.

2.3 Návrh software pro měření tvrdosti

Cílem této bakalářské práce je podrobnější popis návrhu a úprava software tak, aby umožňoval určit tvrdost jak základního materiálu, tak i tenkých vrstev na něm nanesených. Pro vyhodnocení měření jsou potřebná tato data: poloměr otisku, který exportujeme z CSM, poloměr a úhel indentora, které najdeme v manuálu na přístroj. Pro vytvoření tohoto software jsme použili interaktivní programové prostředí Matlab R2014a od firmy MathWorks. Matlab je aplikační balíček pro řešení technických výpočtů a programovací jazyk používaný v tomto balíčku. Tento program umožňuje matematické výpočty, vizualizace dat, vytvoření grafů a tabulek.

2.3.1 Návrh uživatelského rozhraní

Vytvářela jsem komfortní design uživatelského rozhraní popsaného výše, v souladu s požadavky na hodnocení otisku. Ten je založen na 3 důležitých blocích. První blok představuje zadání dat, druhý je pro zobrazení snímku z mikroskopu, třetí blok je vytvořen pro výpočty. Hlavním cílem je dostupnost využívání tohoto interfacu bez potřeby dodatečného používání návodu nebo předchozího zaškolení. Níže je uveden celkový přehled již v kapitole xxx částečně popsaného GUI.



Obrázek 18: Interface programu

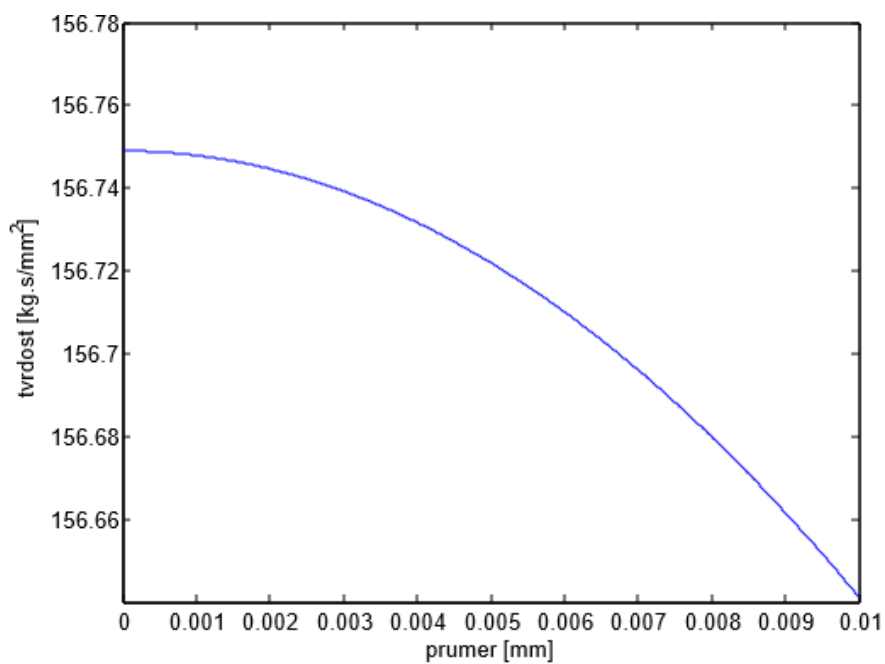
2.3.2 Návrh algoritmů výpočtu tvrdosti

Revetest Scratch Tester je přístroj, který získal mezinárodní přiznání jako přístroj pro testování pevných materiálů nebo materiálů s tloušťkou několik mikrometrů. Aby při velkých tvrdostech materiálu nevycházelo číslo menší než číslo tvrdosti Rockwella, zavádí se fiktivní škála hloubek, kdy jeden dílek se rovná 0,002 mm.

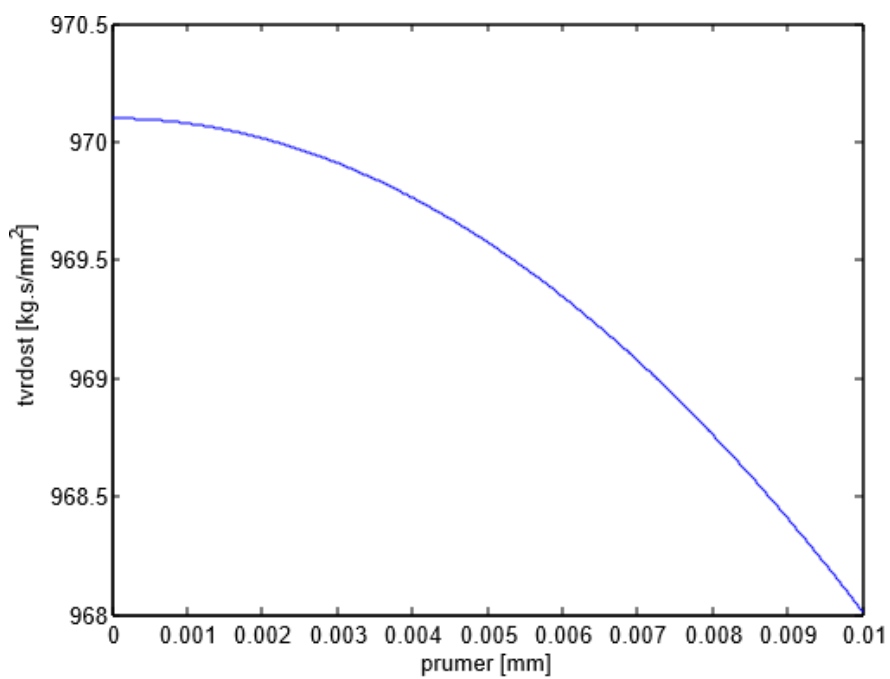
V našem případě se hloubka bude počítat přes průměr otisku. Při stejném tlaku indetnor způsobuje různý otisk pro různé typy kovů. Proto jsem musela odvádět 2 vzorky pro různé případy. V jednom případě se bude hloubka počítat z otisku koule, v druhém z otisku jehlanu.

2.3.3 Návrh algoritmů konverze

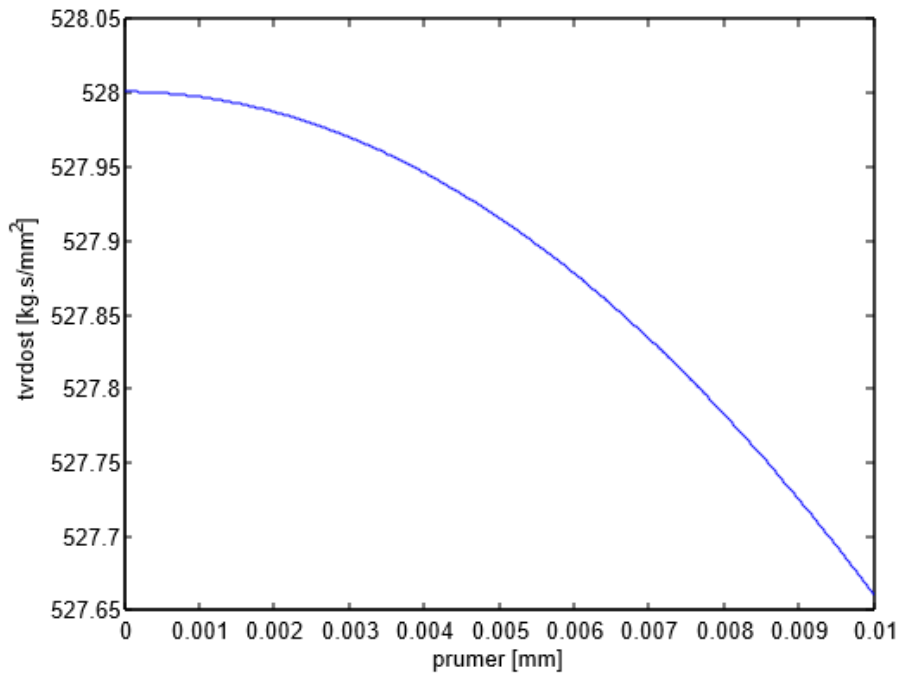
Získaná data můžeme konverzovat do různých typů tvrdosti. Můžeme to udělat dvěma způsoby. Buď určením závislosti přes tabulky tvrdosti (příloha č.4), nebo výpočtem ze vzorců. V mnou navržených algorimech konverze jsem využila obou postupů, podle vhodnosti nebo zdroje získaných dat, jak je uvedeno v kap. 2.2.3 výše. Algoritmizace pouze předpokládá implementaci přepočtyových vzorců popsanych výše do prostředí MatLab. Vstupem je hodnota tvrdosti 15HR nebo přímo odečtená hodnota průměru otisku a výstupem vypočtené hodnoty dalších škál tvrdostí a grafická ukázka diagramů konverze, obr.19-23 níže.



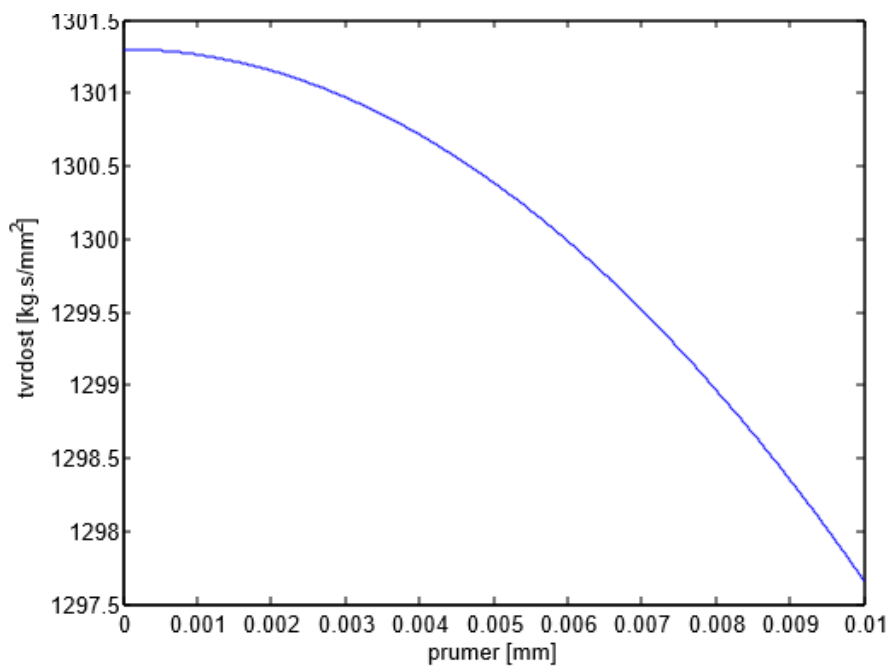
Obrázek 19: Závislost průměru na tvrdosti Shora



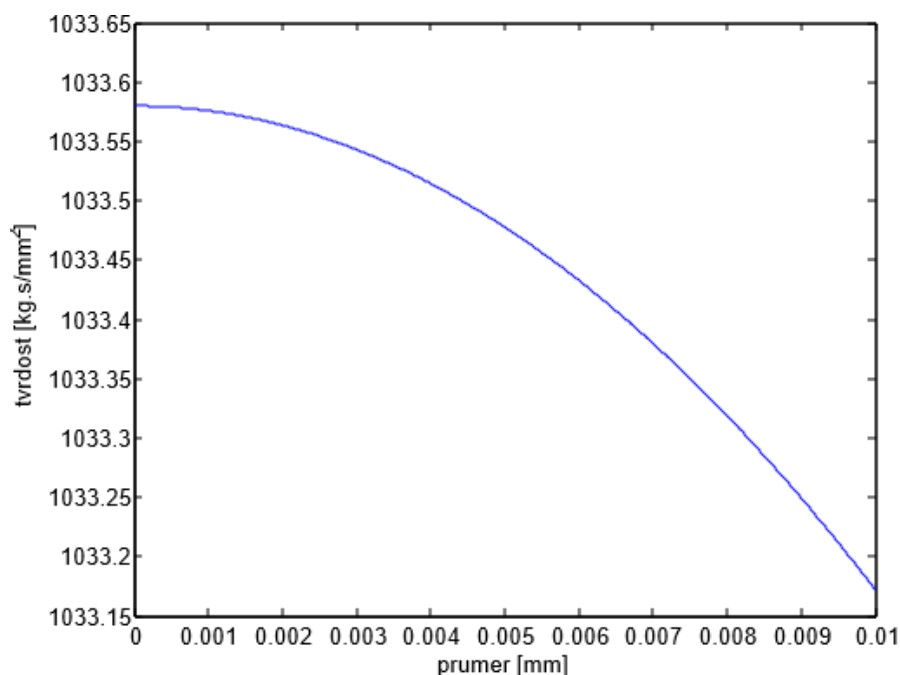
Obrázek 20: Závislost průměru na tvrdosti Vickerse



Obrázek 21: Závislost průměru na tvrdosti Brinella



Obrázek 22: Závislost průměru na tvrdosti Knoop



Obrázek 23: Závislost průměru na tvrdosti Leeba

2.3.4 Závěr kapitoly

V rámci bakalářské práce byl vytvořen software pro výpočet tvrdosti Rockwella. Program je vytvořen v rozhraní Matlab Graphic User Interface (zkráceně Matlab GUI), které umožňuje vytvořit grafické rozhraní programu společně s vytvářením funkčního kódu pro jednotlivé bloky (tlačítka, pole) programu. Algoritmy výpočtů jsou založeny na vzorcích přepočtů a nepředpokládají náročnou algoritmizaci výpočtů. Nejnáročnější tedy pro algoritmizaci bylo zjištění vhodných vztahů přepočtu, které jsem v práci sama navrhla nebo v ověřených zdrojích našla, a následně v prostředí MatLab implementovala.

2.4 Aplikace navržené metody a postupů

2.4.1 Testované vzorky

V své bakalářské práci jsem se snažila použít pro otestování navržených metod a algoritmů materiály, které se používají v medicíně. První materiál je nitrid titanu. TiN je pevný materiál zlaté barvy. Tento materiál se používá s cílem zlepšit trvanlivost nástrojů. V medicíně se nitrid titanu používá jako krycí vrstva řádově několika mikrometrů, která je velmi pevná, a proto je velmi odolná vůči chemickým vlivům na životní prostředí. Takto vysoká kvalita je jedním z rozhodujících faktorů pro použití nátěru v medicíně. Běžně se tento materiál používá pro výrobu kyčelního kloubu, kolena, různých protéz, šroubů, hřebíků pro kostní syntézu.

Dalším materiálem je korozivzdorná tepelně nezpracovaná ocel. Korozivzdorná ocel je základním materiálem pro rozsáhlý seznam lékařských přístrojů a zařízení. Vývoj moderních diagnostických nástrojů a lékařských aplikací inovačních technologií má za následek zvýšenou spotřebu z korozivzdorné oceli v průmyslu. Lékařství se týká takových odvětví, v nichž musí vše být sterilní a kvalitní. Pokud jsou na lékařských přístrojích viditelné stopy rzi, je jejich používání k léčbě pacienta prostě nepřijatelné. Z toho vyplývá, že pro výrobu lékařských nástrojů by měla být použita speciální korozivzdorná ocel. Tyto produkty, při jejichž výrobě se používá lékařská korozivzdorná ocel, mají vysokou životnost. Takto vyrobené nástroje jsou

odolné proti poškrábání, což je velmi důležité, protože v poškrábání mohou vznikat nečistoty, které pak mohou být v průběhu chirurgického zákroku přeneseny do těla pacienta. [3]

Třetím materiálem je titan. Lidský organismus dobře snáší konstrukce ze slitin titanu, proto se používají v medicíně již řadu let. Titanové konstrukce jsou odolné proti korozi v agresivním prostředí lidského těla. Na jejich povrchu vzniká oxidový film, který zabraňuje úniku iontů v těle implantátu. Tkáň kolem těchto implantátů se nemění. Titanové slitiny jsou velmi silné, schopné odolávat těžkému zatížení. Při sterilizaci lékařských nástrojů z titanu alkoholem, spálením, párami formalinu není titanový povrch zničen. A co je nejdůležitější – titanové slitiny nezpůsobují alergie.[17]

Hliník, konkrétně jeho slitina – dural, je čtvrtý z mnoha vybraných materiálů, je hojně používán v stomatologii. V dnešní době roste popularita látek z hliníku, jako je například oxid hlinitý, a to zejména při výrobě zubních korunek. [3]

Poslední zkušební materiál je polymer (UHMW-PE). Polyetylén s ultravysokou molekulovou hmotností je inženýrský termoplast s molekulovou hmotností vyšší než 3,1 AMU. Zvýšená molekulová hmotnost zvyšuje řadu fyzikálních vlastností, jako například je vynikající odolnost proti otěru, vysoká nárazová pevnost a nízké koeficienty tření. Z výše uvedených speciálních vlastností UHMWPE je materiál, který je lépe volitelný v lékařských textiliích, zejména v oblasti celkové kloubní artroplastiky. [16]



Obrázek 24: Ukázka zkušebního materiálu (TiN)

2.4.2 Zhodnocení výsledků testovaných vzorků

Podle výše popsaného postupu v kap.2.1 a kap. 2.2 jsem provedla měření a následné hodnocení vzorků. Bylo provedeno měření pěti vzorků (příloha č.4), přičemž každý byl proměřen 5 krát. Z každého otisku jsem změřila 3 průměry. Parametry měření byly nastaveny takto: předzatížení 29,42 N, maximální zatížení 147,1 N, rychlost vniku indentora do vzorku 880 N/min. Parametry byly zvoleny podle ISO 6508 pro škálu 15N. Výsledky měření jsou uvedeny v následujících dvou tabulkách. Uvedený postup měření a volba parametrů je popsána v kap. 2.2.1 výše.

Tabulka 8: Výsledky pokusu měření ocele, nirtidu titanu a duralu

	Ocel			Nitrid titanu			Hliník		
	1 průměr	2 průměr	3 průměr	1 průměr	2 průměr	3 průměr	1 průměr	2 průměr	3 průměr
1. otisk	0,1792	0,1791	0,1852	0,1551	0,1579	0,1778	0,5071	0,5161	0,5201
2. otisk	0,1991	0,1780	0,1856	0,1613	0,1721	0,1901	0,5315	0,5390	0,5288
3. otisk	0,1761	0,1780	0,1982	0,1496	0,1613	0,1656	0,5226	0,5311	0,5013
4. otisk	0,1685	0,1979	0,1550	0,1468	0,1518	0,1823	0,5773	0,5739	0,4855
5. otisk	0,1762	0,1923	0,1734	0,1330	0,1608	0,1598	0,5288	0,5170	0,5250

Tabulka 9: Výsledky pokusu měření ocele, nirtidu titanu a duralu

	Titan			Polymer		
	1 průměr	2 průměr	3 průměr	1 průměr	2 průměr	3 průměr
1. otisk	0,2356	0,2364	0,2369	1,4270	1,4430	1,4687
2. otisk	0,2337	0,2038	0,2201	1,3650	1,3682	1,4178
3. otisk	0,2118	0,2373	0,2044	1,4344	1,4274	1,5313
4. otisk	0,2210	0,2265	0,2208	1,5430	1,4733	1,5313
5. otisk	0,2186	0,1989	0,2044	1,4389	1,3682	1,4628

Pro vyhodnocení jsem zvolila dva způsoby. Pro první způsob jsem spočítala hodnoty tvrdosti pro jednotlivá měření, které jsou uvedené v tabulce 10 a 11.

Tabulka 10: Vypočtené hodnoty tvrdosti pro jednotlivé průměry

	Ocel			Nitrid titanu			Hliník		
	HR 1 průměr	HR 2 průměr	HR 3 průměr	HR 1 průměr	HR 2 průměr	HR 3 průměr	HR 1 průměr	HR 2 průměr	HR 3 průměr
1. otisk	78	79	77	84	84	79	-15	-18	-19
2. otisk	73	79	77	83	80	76	-22	-25	-21
3. otisk	79	79	74	85	83	82	-20	-22	-13
4. otisk	81	74	84	86	85	78	-36	-35	-9
5. otisk	80	75	80	88	83	83	-22	-18	-21

Tabulka 11: Průměrné hodnoty tvrdosti

	Titan			Polymer		
	HR 1 průměr	HR 2 průměr	HR 3 průměr	HR 1 průměr	HR 2 průměr	HR 3 průměr
1. otisk	63	62	63	-281	-286	-293
2. otisk	63	72	67	-363	-264	-278
3. otisk	70	62	72	-283	-281	-311
4. otisk	67	76	67	-314	-294	-311
5. otisk	68	74	72	-284	-264	-291

Následně jsem zprůměrovala tyto hodnoty (tab. 12).

Tabulka 12: Průměrné hodnoty tvrdosti pro jednotlivé průměry

	Ocel	Nitrid titanu	Hliník	Titan	Polymer
	HR	HR	HR	HR	HR
1. otisk	78,0	82,3	-17,3	62,6	-286,6
2. otisk	76,3	79,6	-22,6	67,3	-301,6
3. otisk	77,3	83,3	-18,3	68,0	-291,6
4. otisk	79,6	83,0	-26,6	70,0	-306,3
5. otisk	78,3	84,6	-20,3	71,3	-279,6

Získané hodnoty tvrdosti jsem následně konverzovala do jiných metod měření tvrdosti, viz. tab.13.

Tabulka 13: Konverze získaných dat

	HR 15N	HS	HV	HK	HL	HB
	82,3	58,50	483,10	649,46	368,95	407,94
Nitrid titanu	79,6	52,07	422,28	598,75	372,55	353,43
	83,3	61,04	508,32	669,16	367,80	430,56
	83,0	60,26	500,60	663,20	368,14	423,64
	84,6	64,50	543,27	695,51	366,46	461,94
	78,0	48,58	391,24	570,40	375,03	325,66
Ocel	76,3	45,13	362,33	541,69	377,95	299,85
	77,3	47,13	378,83	558,40	376,20	314,57
	79,6	52,07	422,27	598,75	327,55	353,43
	78,3	49,22	369,77	575,62	374,54	330,61
	-17,3	262,77	5254,9	1177,1	990,09	4754,5
Hliník	-22,6	299,05	5912,9	1343,3	1051,3	5352,0
	-18,3	269,42	5375,9	1207,4	1207,4	4894,4
	-26,6	328,13	6436,6	1478,0	1478,0	5827,5
	-20,3	282,98	5622,4	1269,5	1269,5	5088,2

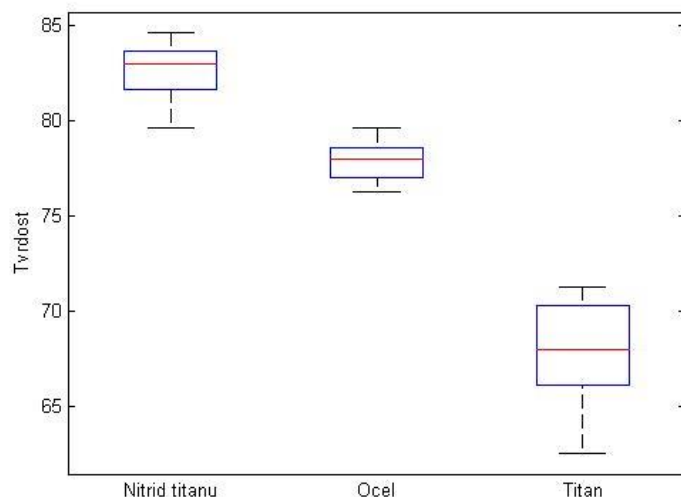
	HR 15N	HS	HV	HK	HL	HB
	62,6	26,96	282,76	362,67	412,16	230,84
	67,3	31,26	279,31	413,57	398,28	226,65
Titan	68,0	32,07	281,54	422,09	396,41	228,52
	70,0	34,65	291,85	447,78	391,32	237,4
	71,3	36,51	301,67	465,54	388,23	246,01
	-286,6	5355,2	53552	27291	7696,4	81945
	-301,6	5899,7	58337	29805	8285,7	89054
Polymer	-291,6	5512,4	55124	28117	7890,3	84282
	-306,3	5987,9	59879	30616	8475,1	91342
	-279,6	5138,9	51389	36156	7429,2	78729

Následně jsem určila medián hodnot tvrdosti z jednotlivých tvrdostí otisků,

Tabulka 14: Mediány získaných tvrdostí měřených materiálů

	HR 15N	HS	HV	HK	HL	HB
Nitrid titanu	83	60,26	500,60	663,20	368,14	423,64
Ocel	78,0	48,58	378,83	570,40	375,03	325,66
Hliník	-20,3	282,98	5622,4	1269,5	1207,4	5088,2
Titan	68,0	32,07	282,76	422,09	396,4	230,84
Polymer	-291,6	5512,4	55124	29805	7890,3	84282

V případě měkkých materiálů se ukazuje použití metody měření tvrdosti 15HR nevhodné, a tak jsem dále materiály měkké nehodnotila. Sestavila jsem boxploty, také tzv. krabicové diagramy pro nitrid titanu, ocel a titan, viz. Obr.24.



Obrázek 25: Boxplot tvrdých měřených materiálů

Dále jsem použila a otestovala postup určení tvrdosti přímo z naměřených hodnot aritmetický průměrů průměrů, a to abych zjistila, zdali se výsledky budou lišit od prvně popsaného postupu. Tabulka pro určený aritmetický průměr ze tří průměrů a pro něj určená tvrdost je v tab.15.

Tabulka 15: Výpočet aritmetického průměru a tvrdosti

	Ocel		Nitrid titanu		Hliník		Titan		Polymer	
	\bar{x}	HR 15N	\bar{x}	HR 15N	\bar{x}	HR 15N	\bar{x}	HR 15N	\bar{x}	HR 15N
1. otisk	0,1812	78	0,1636	82	0,5144	-18	0,2364	63	1,4462	-287
2. otisk	0,1876	76	0,1745	80	0,5331	-23	0,2192	68	1,3837	-268
3. otisk	0,1773	79	0,1579	84	0,5183	-19	0,2179	68	1,4644	-291
4. otisk	0,1845	77	0,1512	85	0,5456	-27	0,2227	67	1,5159	-306
5. otisk	0,1806	78	0,1512	85	0,5236	-20	0,2073	71	1,5159	-307

Získané hodnoty tvrdosti konverzovala do jiných metod měření tvrdosti.

Tabulka 16: Konverze získaných dat

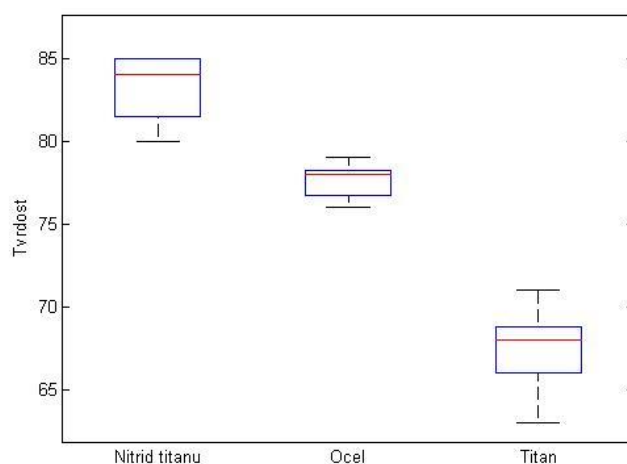
	HR 15N	HS	HV	HK	HL	HB
	82	57,74	475,82	643,64	369,31	401,41
Nitrid titanu	80	52,98	430,62	606,03	371,97	360,90
	84	62,87	526,83	683,26	367,06	447,18
	85	65,57	554,52	703,79	366,09	472,05
	85	65,57	554,52	703,79	366,09	472,05
	78	48,58	391,24	570,40	375,03	325,66
Ocel	76	44,55	357,66	536,76	378,50	295,69
	79	50,73	410,20	587,96	373,45	342,62
	77	46,52	373,72	553,34	376,71	310,02
	78	48,58	391,24	570,41	375,03	325,66
	-18	267,41	5339,5	1198,2	998,01	4831,3
Hliník	-23	301,89	5964,3	1356,4	1056,0	5398,6
	-19	274,13	5461,5	1228,9	1009,4	4942,2
	-27	331,12	6490,3	1491,9	1104,2	5876,2
	-20	280,93	5585,0	1260,0	1020,9	5054,3
	63	27,25	281,21	366,58	410,89	229,35
Titan	68	32,07	281,54	422,09	396,41	228,52
	68	32,07	281,54	422,09	396,41	228,52
	67	30,92	278,57	409,99	399,10	226,05
	71	36,07	299,18	461,37	388,93	243,83
	-287	5367,7	90575	27356	7711,8	82131
Polymer	-268	4790,3	81102	24328	6997,3	73542
	-291	5493,4	92637	28017	7866,9	84000

-306	5978,0	10057	30564	8462,9	91195
-307	6011,0	10111	30738	8503,5	91686

Opět je zřejmé, že měkké materiály není vhodné měřit navrženou metodou. Následně jsem pro tvrdé materiály opět vynesla Boxplot, obr. 25.

Tabulka 17: Mediány získaných tvrdosti získaných z výpočtu aritmetických průměrů průměru otisku

	HR 15N	HS	HV	HK	HL	HB
Nitrid titanu	84	62,87	526,83	683,26	367,06	447,18
Ocel	78	48,58	391,24	570,40	375,03	325,66
Hliník	-20	280,93	5585,0	1260,0	1020,9	5054,3
Titan	68	32,07	281,54	422,09	396,41	228,52
Polymer	-291	5493,4	81102	28017	7866,9	84000



Obrázek 26: Boxplot tvrdých měřených materiálů

Je zřejmé, že obě použité metody vedou k mírně odlišnému rozdílu v zjištěné hodnotě tvrdosti.

3. Diskuse

V protetice, pro poskytování maximálního komfortu a požadované aktivity, je nutné použít vysoce kvalitní materiál, stejně jako udělat kvalitní výpočty před zvolením materiálu. Jakákoliv chyba, a to i nejmenší, může být velkým problémem pro člověka s protézou, až do výměny této protézy. Aby k tomu nedošlo, každá jednotlivá protéza se vyrábí pro pacienta, s použitím všech charakteristik a funkcí těla pacienta. Jedním z nejdůležitějších aspektů je míra zatížení na část nebo části protézy a tvrdost použitého materiálu. Aby protéza sloužila po dlouhou dobu, nejčastěji ji vyrábějí ze slitiny titanu.

Při výrobě protéz se musí provést hodně zkoušek pro zjištění charakteristik mechanických vlastností kovových a nekovových materiálů. Pro provádění těchto zkoušek používají buď přístroje pro jednotlivá měření, anebo univerzální přístroje pro komplexní měření. Avšak ne vždycky univerzální přístroje obsahují veškeré možnosti zkoušek, které bysme potřebovali, proto budete muset koupit další vybavení. V práci jsem navrhla metodiku, která mě umožňuje využít systém pro měření adheze k měření tvrdosti materiálu, a následně určit tvrdosti v jiných škálách. tomu je však nutné navrhnout vhodný SW a úpravou vstupních parametrů, abychom rozšířili spektrum zkoušek a vyhledali se dalším finančním nákladů.

V rámci dané práce jsem tedy měla 3 hlavní cíle: navrhnout a ověřit metodiku měření tvrdosti, vytvořit SW pro danou metodiku a vyhodnotit výsledky experimentálního měření s cílem ověřit navržené metody a SW. K dispozici jsem měla přístroj pro měření adheze Revetest Xpress. Modifikaci SW pro daný přístroj jsem chtěla dosáhnout toho, aby těmto přístrojem bylo možné měřit tvrdost.

Na začátku musela jsem navrhnout metodiku měření. Pro výpočet tvrdosti podle Rockwella, musíme znát hloubku otisku. Přístrojem Revetest Xpress se nedá měřit hloubka. V mnou navrženém postupu tedy provádím vyhodnocení průměru otisku opticky pomocí mikroskopu Dino-Lite. Za tímto účelem jsem odvodila a navrhla vztahy výpočtu hloubky z průměru (respektive poloměru) otisku. Indentor systému Revetest Xpress má tvar kužele, ale má zaoblený konec. Aby jsem zamezila chybě vyvození tvrdosti, která mohla vzniknout považují-li konec kužele za ostrý, odvodila jsem vztahy pro výpočet hloubky z otisku pro dva různé případy: 1) kdy do materiálu vnikne jen zaoblený konec a 2) kdy do materiálu vnikne kuželovitý hrot. Při testech se skutečně ukázalo, že uvedená chyba ve výpočtu by mohla být významná, především v případě velmi tvrdých materiálů.

Uvedené výpočtu jsem implementovala v prostředí MaTlab a vytvořila jsem vhodný SW pro výpočet tvrdosti podle mnou navržené metody. SW byl vytvořen v prostředí Matlab R2014a GUI. Komfortní design interfacu a jednoduché ovládaní umožňuje používat daný program bez zaškolení nebo jiných aplikací. Pokud vznikne problém, lze použít mnou vypracovaný návod (příloha č. 6), kde je podrobně rozepsaný postup měření. Tento SW lze použít nejen pro přístroj Revetest Xpress, ale i pro jiné přístroje, které fungují na stejném principu. Toto považuji za velký přínos mé práce, neboť se uvedeným problémem možnosti vzniku chyby příliš odborných prací nevěnovalo.

Pro ověření SW jsem použila 5 různých vzorků. Každý vzorek byl proměřen 5 krát. Podmínky zkoušky měření byly zvoleny podle ISO normy 6508: předzatížení 29,42 N, maximální zatížení 147,1 N, rychlost vniku indentoru do vzorku 880 N/min. Tyto hodnoty jsou

zvolené pro měření tvrdosti podle Rockwella (škála 15N). Následně pomocí SW u každého otisku bylo vypočteno 3 průměry. Výsledky měření jsou uvedené v tabulkách 8, 9. Výpočet tvrdosti podle Rockwella (škála 15N) jsem prováděla dvěma způsoby. První způsob spočívá v tom, že z jednotlivých průměrů jsem spočítala tvrdost a následně tuto tvrdost zprůměrovala pro každý otisk. Podstatou druhého způsobu bylo zprůměrování hodnot průměru jednoho otisku a následně z této hodnoty byla spočítána tvrdost. Každá s těchto dvou tvrdosti byla převedena do pěti jiných metod tvrdosti: Knoop, Leebe, Schora, Vikerse a Brinella. Tj. v rámci práce jsem také navrhla algoritmy a následně SW pro převod měřených hodnot do různých škál tvrdosti. Ve spojení s měřením průměru otisku nebylo uvedené v jiných pracích zatím řešeno. Hodnoty konverze pro každý otisk zvlášť jsou uvedené v tabulkách č.13, 16 (nebo viz příloha č.5). Výslednou hodnotu tvrdosti jsem spočítala z mediánu, protože tento není tak citlivý na odlehle hodnoty jako aritmetický průměr. Mediány těchto hodnot jsou uvedené v tabulkách 14,17.

Zvolením několika metod jsem se snažila najít metodu nejvhodnější resp. nejpřesnější. Při porovnání těchto metod (výsledné tabulky jsou 14 a 17), mohu konstatovat, že navržené postupy a SW jsou přesné, neboť vypočtené hodnoty se shodují s tabulkovými resp. očekávanými hodnotami tvrdosti tvrdých materiálů. Z tabulek je zřejmé, že hodnota tvrdosti je záporná pro hliník a polymer, tj. měkké materiály. Tj. navržená metoda není vhodná pro měření měkkých materiálů, tak jak je také zmíněno v publikacích, že pro měkké materiály je vhodné používat jiné metody měření, např. metoda podle Brinella. Ze vzorečku (6) pro výpočet tvrdosti podle Rockwella 15N je zřejmé, že hodnota hloubky nesmí překročit 0,1 mm, neboť pak je tvrdost špatně hodnocena a mimo rozsah hodnot tvrdosti očekávaných. Polymer a hliník jsou měkké materiály. Při stejném zatížení indentor se víc ponoří do měkkých materiálů, než do tvrdých. V našem případě hloubka ponoření se překročila právě zmíněných 0,1 mm, proto je hodnota tvrdosti záporná. Můžeme říct, že takto udělaný SW je vhodný pro měření tvrdých materiálů. Pro vyhodnocení měkkých materiálů je vhodné použít tvrdost podle Brinella, ale k tomuto nemáme na FBMI ČVUT vhodný měřicí systém s vhodným indentorem.

V závěru jsem sestrojila jsem boxploty pro hodnoty tvrdosti podle Rockwella (graf 24,25). Vynechala jsem materiály, ve kterých tvrdost vyšla záporně. Jak je z výsledků zřejmé, že nejtvrdší je nitrid titanu, měkkí je polymer a hodnoty odpovídají tabulkovým, tj. navržené postupy se ukázali vhodné.

4. Závěr

Jednou z nejčastějších vlastností, které určují kvalitu povrchů kovů a slitin, tj. schopnost jejich použití v různých provedeních a pro různé provozní podmínky, je tvrdost. Zkoušky tvrdosti jsou prováděny častěji než stanovení jiných mechanických vlastností kovů: tahu, prodloužení

a další. Tvrdost materiálu je schopnost odolávat mechanickému pronikání jiného pevného tělesa. Tvrdost je definována jako hodnota zatížení potřebná k poškození povrchu materiálu. Existuje relativní a absolutní tvrdost. Absolutníneboli instrumentální tvrdost je měřena pomocí metody vniknutí tělesa. Právě metodikou měření a výpočtu absolutní tvrdosti jsem se věnovala. Teoretická část této bakalářské práce byla zaměřena na popis různých typů zkoušek absolutní tvrdosti a využití těchto poznatků k návrhu výpočtových vztahů a vztahů pro konverze hodnot tvrdostí. V praktické části jsem zaměřila na vytvoření SW tak, aby přístrojem určeného pro

měření adheze povrchu se dala také měřit tvrdost. SW byl vytvořen v programovém prostředí Matlab R2014a GUI. Navržené metody, algoritmy a presentovaný SW jsou vhodné především pro praxi, testování a vývoj nových materiálů a tenkých vrstev povlaků.

4.1 Naplnění cílů práce

Ve své bakalářské práci jsem navrhla metodu výpočtu tvrdosti z velikosti otisku a vytvořila jsem postupy měření a SW prostředí. Program byl vytvořen v prostředí Matlab R2014a Graphic User Interface. Pro usnadnění práci s programem jsem vytvořila návod k měření, který lze nalézt kliknutím tlačítka Help v programu nebo v přílohách (č. 6) k dané bakalářské práci.

Navržené postupy a SW jsem otestovala na pěti vzorcích materiálu, které jsou často používané v klinické praxi jako součásti lékařských pomůcek. Ověřila jsem tak funkčnost, a vhodnost navrženého. Na závěr jsem výsledky měření vyhodnotila. Při provedení měření tvrdosti jsem zvolila metody výpočtu a hodnocení v souladu ISO normami. Tímto jsem naplnila cíle práce.

4.2 Perspektivy dalšího využití navržených metod a postupů

Možnost lepšího měření a určení hodnot tvrdosti, které umožní objektivní, vyhodnocení předpokládá pouze doplnění dalších zařízení k systému Revetest Xpress. Tato realizace by však byla finančně nákladná. Doporučuji tedy spíše využít mnou navržených metod a SW, a otestovat je na větší škále materiálů, a porovnat s měřením tvrdosti na systémech speciálních, a výsledky srovnávacího měření porovnat. Lze předpokládat, že výsledky budou obdobné, ale doporučuji testovat větší množství různých typů materiálů, a stanovit pro jaké materiály je mnou navržený postup měření tvrdosti vhodná a pro jaké nikoliv. Očekávám, že pro měření tvrdých materiálů má metoda vhodná je, jak jsem prokázala testováním vzorku pěti materiálů.

Dále by bylo vhodné otestovat mimo použitý Revetest Xpress i jiné systémy pro realizaci otisku, a ověřit předpoklad, že všechny obdobné systémy nám umožní využitím mého SW určovat tvrdost tvrdších materiálů. Uvedené povede k snížení finančních nákladů na dovybavení těchto přístrojů.

Přehled použité literatury

- [1] Molliková, Eva. ZKOUŠENÍ MATERIÁLŮ A VÝRBOKŮ, 2005
- [2] О.В. Мальков, А.В. Литвиненко. Измерение твердости металлов, 2000г
- [3] А.П. Смирягин, Н.А. Смирягина. А.В, Белова. Промышленные цветные металлы и сплавы. Справочник Третье издание, дополнительное и переработанное Издательство «Метталургия», Москва 1974г.
- [4] Б.С. Тихонов Тяжелые цветные металлы и сплавы. Справочник. Том I по редакции кандидата технических наук Подвигишенского С.Н., Москва 2000г
- [5] Daniel M., Experimentální biomechanika, ed. skripta, ČVUT, 2008, ISBN 978800103982
- [6] Soumarová Alena, Nové metody hodnocení vlastností a kvality tenkých vrstev pro biomedicínu, 2012
- [7] Revetest Xpress, [online], [cit.22.01.2017] https://lists.man.lodz.pl/pipermail/odlew-pl/2008/09/att-0006/R SX_EN.pdf
- [8] Kutilek P, The procedure of evaluation the practical adhesion strength of new biocompatible nano-and micro-thin films in accordance with international standards Acta of Bioengineering and Biomechanics, ročník 13, číslo 3, 2011
- [9] ČSN ISO 6508-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Rockwella - Část 1: Zkušební metoda, Praha : Český normalizační institut, 2005. 24 s
- [10] ČSN ISO 6507-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Vikerse - Část 1: Zkušební metoda, Praha : Český normalizační institut, 2006. 24 s
- [11] HLUCHÝ, Miroslav, KOLOUCH, Jan. Stojírenská technologie 1 -1. díl: Nauka o materiálu. 3. vyd. Praha: Scientia, 2002. 266 s.
- [12] PTÁČEK, Ludvík a kolektiv. Nauka o materiálu. 2. vyd. Brno: CERM-akademické nakladatelství. 520 s.
- [13] LUDVÍK, Jan, BÍLEK, Karel, LUDVÍK Štěpán. Zkoušky tvrdosti. 3. vyd. Kladno: Metrotest Kladno. 22 s.
- [14] ČSN ISO 6506-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda, Praha : Český normalizační institut, 2015. 20 s
- [15] ČSN ISO 4545-1 Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Knoopu - Část 1: Zkušební metoda, Praha : Český normalizační institut, 2005. 17 s
- [16] Kurtz, Steven M. (2004). The UHMWPE handbook: ultra-high molecular weight polyethylene in total joint replacement. Academic Press. ISBN 978-0-12-429851-4
- [17] Greenwood, Norman N.; Earnshaw, Alan (1997). Chemistry of the Elements (2nd ed.). Butterworth-Heinemann. p. 962. ISBN 0-08-037941-9.

Příloha

Příloha č. 1

Tabulka 1: Podmínky měření vybraných zkoušek tvrdosti [4]

Symbol stupnice	Typ hrotu. (Průměr v palcích)	Pd zatížení v Newtonech (kg síly)	Maximální síla Newtonů (kgf)
15N	Sphericoconical diamond	29.42 (3)	147.1 (15)
30N	Sphericoconical diamond	29.42 (3)	294.2 (30)
45N	Sphericoconical diamond	29.42 (3)	441.3 (45)
15T	Ball 1.588 (1/16)	29.42 (3)	147.1 (15)
30T	Ball 1.588 (1/16)	29.42 (3)	294.2 (30)
45T	Ball 1.588 (1/16)	29.42 (3)	441.3 (45)
15W	Ball 3.175 (1/8)	29.42 (3)	147.1 (15)
30W	Ball 3.175 (1/8)	29.42 (3)	294.2 (30)
45W	Ball 3.175 (1/8)	29.42 (3)	441.3 (45)
15X	Ball 6.350 (1/4)	29.42 (3)	147.1 (15)
30X	Ball 6.350 (1/4)	29.42 (3)	294.2 (30)

45X	Ball 6.350 (1/4)	29.42 (3)	441.3 (45)
15Y	Ball 12.70 (1/2)	29.42 (3)	294.2 (30)
30Y	Ball 12.70 (1/2)	29.42 (3)	294.2 (30)
45Y	Ball 12.70 (1/2)	29.42 (3)	441.3 (45)

Příloha č. 2

Tabulka 2: Podmínky měření vybraných zkoušek tvrdosti [4]

Symbol stupnice	Typ hrotu. Průměr v palcích)	Předběžná síla v Newtonech (kg síly)	Celková síla Newtonů (kgf)
A	Spheroconical diamond	98.07 (10)	588.4 (60)
B	Ball 1.588 (1/16)	98.07 (10)	980.7 (100)
C	Spheroconical diamond	98.07 (10)	1471 (150)
D	Spheroconical diamond	98.07 (10)	980.7 (100)
E	Ball 3.175 (1/8)	98.07 (10)	980.7 (100)
F	Ball 1.588 (1/16)	98.07 (10)	588.4 (60)
G	Ball 1.588 (1/16)	98.07 (10)	1471 (150)
H	Ball 3.175 (1/8)	98.07 (10)	588.4 (60)
K	Ball 3.175 (1/8)	98.07 (10)	1471 (150)

L	Ball 6.350 (1/4)	98.07 (10)	588.4 (60)
M	Ball 6.350 (1/4)	98.07 (10)	980.7 (100)
P	Ball 6.350 (1/4)	98.07 (10)	1471 (150)
R	Ball 12.70 (1/2)	98.07 (10)	588.4 (60)
S	Ball 12.70 (1/2)	98.07 (10)	980.7 (100)
V	Ball 12.70 (1/2)	98.07 (10)	1471 (150)

Příloha č. 3

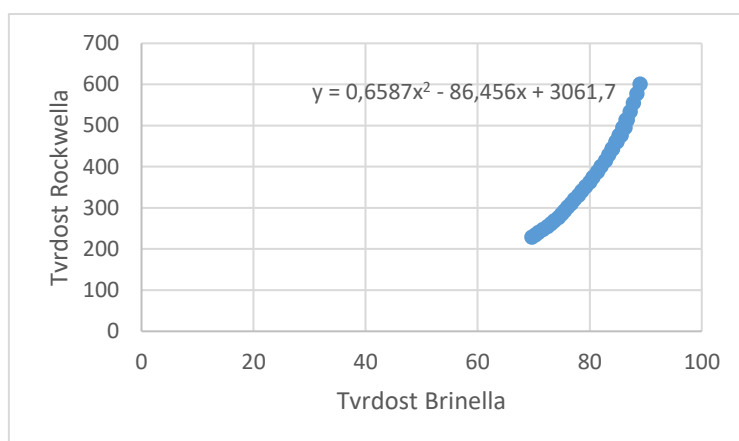
Tabulka 3: Tabulka konverze hodnot tvrdosti

Diameter of Brinell indent (mm)	Brinell hardness 10mm.load 3000kg	Vickers hardness	Rockwell hardness				Rockwell superficial hardness			Shore Hardness	Tensile Strength N/mm ² Approximate value
	Standard or Hultgren or Tungsten carbide ball		A Scale load 60kgf Diamond Penetration	B Scale load 100kgf (1.588mm) Ball	C Scale load 150kgf Diamond Penetration	D Scale load 100kgf Diamond Penetration	15-N Scale load 10kgf	30-N Scale load 30kgf	45-N Scale load 45kgf		
	HB		HV	HRA	HRB	HRC	HRD	HR15N	HR30N		
2.50	601 ³⁾	640	79.8	-	57.3	68.7	89.0	75.1	63.5	77	2055
2.55	578 ³⁾	615	79.1	-	56.0	67.7	88.4	73.9	62.1	75	1979
2.60	555 ³⁾	591	78.4	-	54.7	66.7	87.8	72.7	60.6	73	1903
2.65	534 ³⁾	569	77.8	-	53.5	65.8	87.2	71.6	59.2	71	1834
2.70	514 ²⁾	553	77.1	-	52.5	65.0	86.7	70.7	58.0	-	1765
	514 ³⁾	547	76.9	-	52.1	64.7	86.5	70.3	57.6	70	1765
2.75	495 ¹⁾	539	76.7	-	51.6	64.3	86.3	69.9	56.9	-	1703
	495 ²⁾	530	76.4	-	51.1	63.9	86.0	69.5	56.2	-	1703
	495 ³⁾	528	76.3	-	51.0	63.8	85.9	69.4	56.1	68	1703
2.80	477 ¹⁾	516	75.9	-	50.3	63.2	85.6	68.7	55.2	-	1641
	477 ²⁾	508	75.6	-	49.6	62.7	85.3	68.2	54.5	-	1641
	477 ³⁾	508	75.6	-	49.6	62.7	85.3	68.2	54.5	66	1641

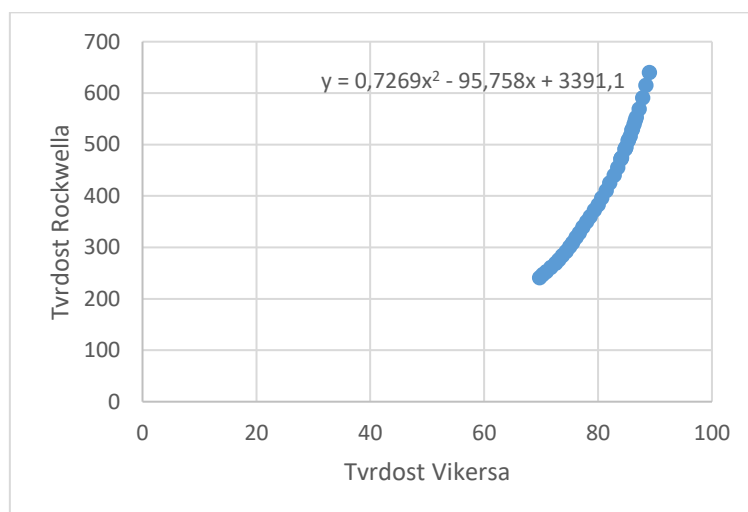
2.85	461 ¹⁾	495	75.1	-	48.8	61.9	84.9	67.4	53.5	-	1579
	461 ²⁾	491	74.9	-	48.5	61.7	84.7	67.2	53.2	-	1579
	461 ³⁾	491	74.9	-	48.5	61.7	84.7	67.2	53.2	65	1579
2.90	444 ¹⁾	474	74.3	-	47.2	61.0	84.1	66.0	51.7	-	1517
	444 ²⁾	472	74.2	-	47.1	60.8	84.0	65.8	51.5	-	1517
	444 ³⁾	472	74.2	-	47.1	60.8	84.0	65.8	51.5	63	1517
2.95	429	455	73.4	-	45.7	59.7	83.4	64.6	49.9	61	1462
3.00	415	440	72.8	-	44.5	58.8	82.8	63.5	48.4	59	1407
3.05	401	425	72.0	-	43.1	57.8	82.0	62.3	46.9	58	1351
3.10	388	410	71.4	-	41.8	56.8	81.4	61.1	45.3	56	1303
3.15	375	396	70.6	-	40.4	55.7	80.6	59.9	43.6	54	1255
3.20	363	383	70.0	-	39.1	54.6	80.0	58.7	42.0	52	1213
3.25	352	372	69.3	(110.0)	37.9	53.8	79.3	57.6	40.5	51	1172
3.30	341	360	68.7	(109.0)	36.6	52.8	78.6	56.4	39.1	50	1138
3.35	331	350	68.1	(108.5)	35.5	51.9	78.0	55.4	37.8	48	1103
3.40	321	339	67.5	(108.0)	34.3	51.0	77.3	54.3	36.4	47	1069
3.45	311	328	66.9	(107.5)	33.1	50.0	76.7	53.3	34.4	46	1034
3.50	302	319	66.3	(107.0)	32.1	49.3	76.1	52.2	33.8	45	1007
3.55	293	309	65.7	(106.0)	30.9	48.3	75.5	51.2	32.4	43	979
3.60	285	301	65.3	(105.5)	29.9	47.6	75.0	50.3	31.2	-	951
3.65	277	292	64.6	(104.5)	28.8	46.7	74.4	49.3	29.9	41	924
3.70	269	284	64.1	(104.0)	27.6	45.9	73.7	48.3	28.5	40	903
3.75	262	276	63.6	(103.0)	26.6	45.0	73.1	47.3	27.3	39	883
3.80	255	269	63.0	(102.0)	25.4	44.2	72.5	46.2	26.0	38	862
3.85	248	261	62.5	(101.0)	24.2	43.2	71.7	45.1	24.5	37	841
3.90	241	253	61.8	100.0	22.8	42.0	70.9	43.9	22.8	36	820
3.95	235	247	61.4	99.0	21.7	41.4	70.3	42.9	21.5	35	800
4.00	229	241	60.8	98.2	20.5	40.5	69.7	41.9	20.1	34	779
4.05	223	234	-	97.3	(18.8)	-	-	-	-	-	758
4.10	217	228	-	96.4	(17.5)	-	-	-	-	33	738
4.15	212	222	-	95.5	(16.0)	-	-	-	-	-	717
4.20	207	218	-	94.6	(15.2)	-	-	-	-	32	696
4.25	201	212	-	93.8	(13.8)	-	-	-	-	31	683
4.30	197	207	-	92.8	(12.7)	-	-	-	-	30	669
4.35	192	202	-	91.9	(11.5)	-	-	-	-	29	655
4.40	187	196	-	90.7	(10.0)	-	-	-	-	-	641
4.45	183	192	-	90.0	(9.0)	-	-	-	-	28	627
4.50	179	188	-	89.0	(8.0)	-	-	-	-	27	614
4.55	174	182	-	87.8	(6.4)	-	-	-	-	-	600
4.60	170	178	-	86.8	(5.4)	-	-	-	-	26	586
4.65	167	175	-	86.0	(4.4)	-	-	-	-	-	572
4.70	163	171	-	85.0	(3.3)	-	-	-	-	25	565
4.80	156	163	-	82.9	(0.9)	-	-	-	-	-	538
4.90	149	156	-	80.8	-	-	-	-	-	23	517

5.00	143	150	-	78.7	-	-	-	-	-	22	496
5.10	137	143	-	76.4	-	-	-	-	-	21	483
5.20	131	137	-	74.0	-	-	-	-	-	-	455
5.30	126	132	-	72.0	-	-	-	-	-	20	441
5.40	121	127	-	69.8	-	-	-	-	-	19	427
5.50	116	122	-	67.6	-	-	-	-	-	18	414
5.60	111	117	-	65.7	-	-	-	-	-	15	400
5.70	107 ¹⁾	113	-	64	-	-	-	-	-	-	379
5.80	103 ¹⁾	108	-	61	-	-	-	-	-	-	365

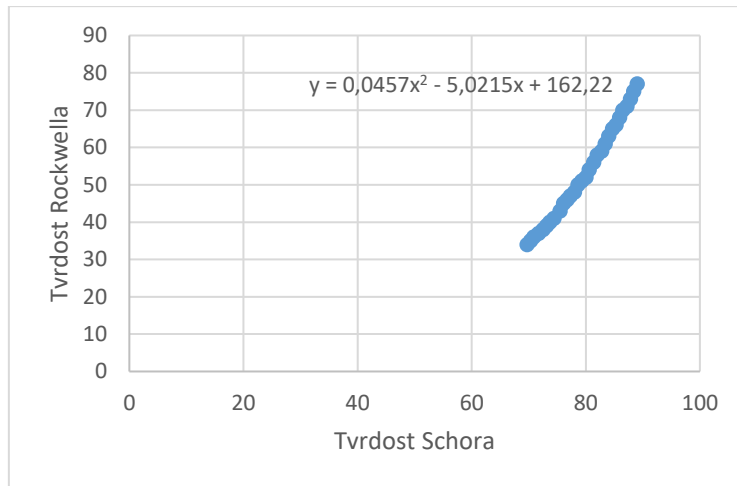
Příloha č. 4 Grafy konverze hodnot tvrdosti Rockwella



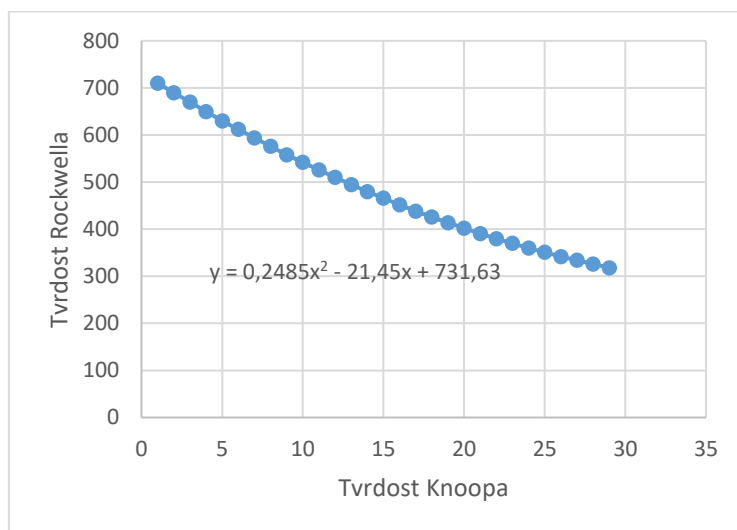
Graf č. 1: Závislost tvrdosti Rockwella na tvrdosti Brinella



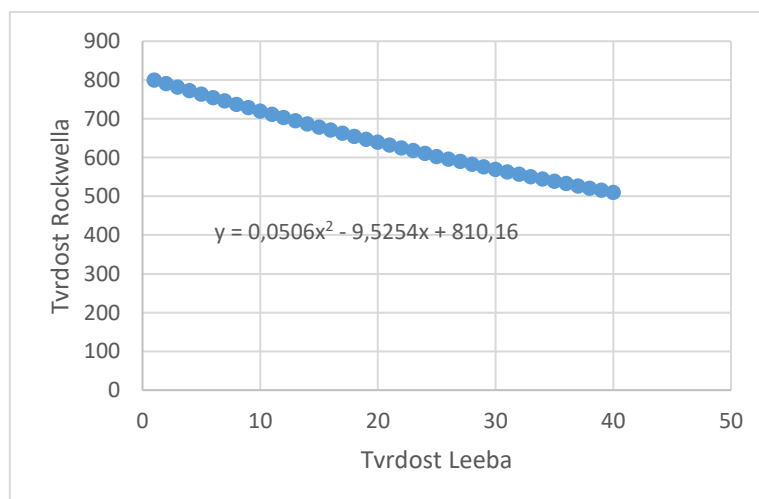
Graf č. 2: Závislost tvrdosti Rockwella na tvrdosti Vickersa



Graf č. 3: Závislost tvrdosti Rockwella na tvrdosti Schora



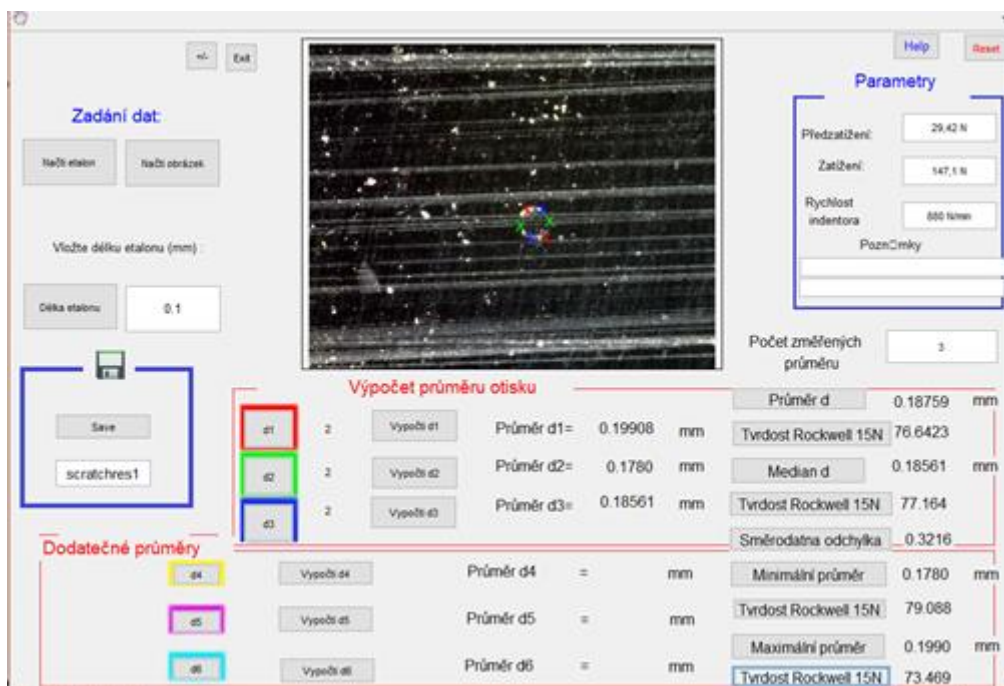
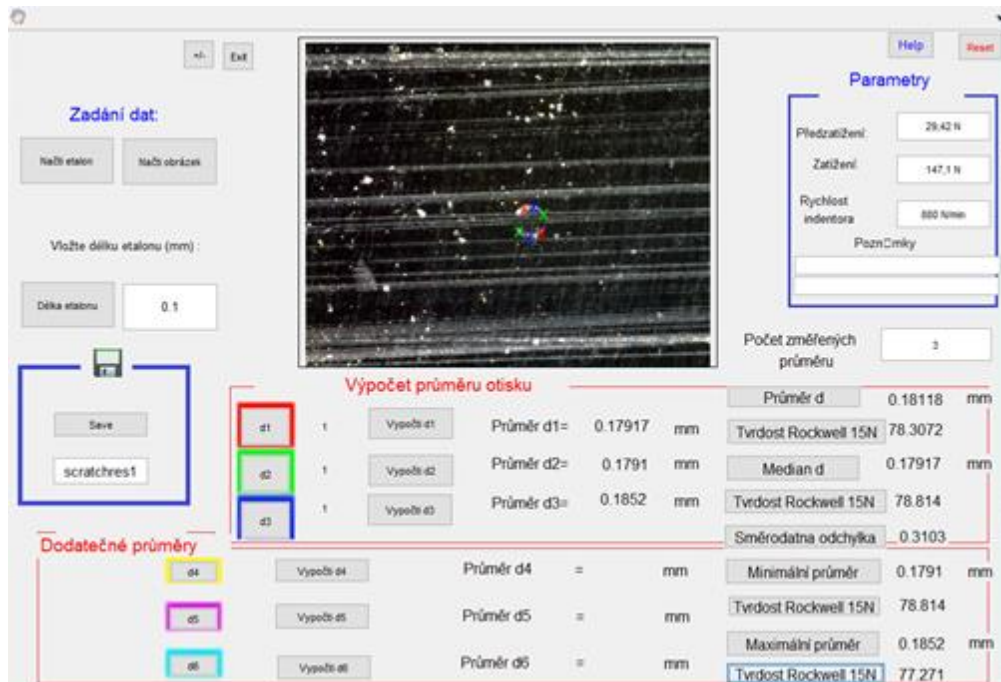
Graf č. 4: Závislost tvrdosti Rockwella na tvrdosti Knoopa



Graf č. 5: Závislost tvrdosti Rockwella na tvrdosti Leebea

Příloha č. 5 Výstupní protokoly s výsledky z navrženého programu

Výsledky měření pro ocel a pět otisků



Help Reset

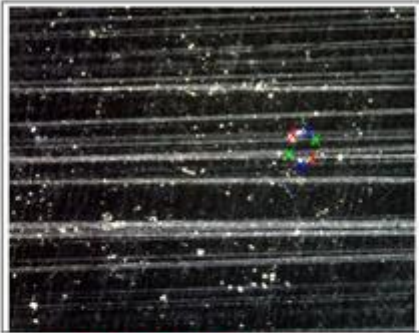
Zadání dat:

Načti etalon Načti obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu: 0.1

Save
scratches1



Parametry

Předzatížení: 29.42 N
Zatížení: 147.1 N
Rychlost indentora: 880 mm/s
Poznámky:

Počet změřených průměrů: 3

Výpočet průměru otisku

d1	3	Vypočti d1	Průměr d1=	0.17609	mm
d2	3	Vypočti d2	Průměr d2=	0.1780	mm
d3	3	Vypočti d3	Průměr d3=	0.19824	mm

Dodatečné průměry

d4	Vypočti d4	Průměr d4 =	mm
d5	Vypočti d5	Průměr d5 =	mm
d6	Vypočti d6	Průměr d6 =	mm

Průměr d	0.18413	mm
Tvrdost Rockwell 15N	77.5501	
Median d	0.17807	mm
Tvrdost Rockwell 15N	79.088	
Směrodatná odchylka	0.3090	
Minimální průměr	0.1760	mm
Tvrdost Rockwell 15N	79.577	
Maximální průměr	0.1982	mm
Tvrdost Rockwell 15N	73.710	

Help Reset

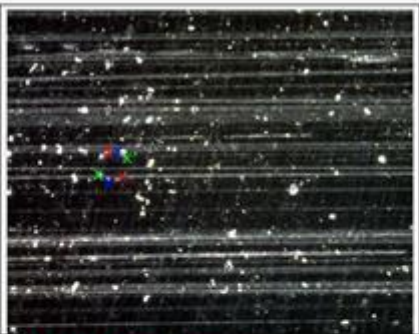
Zadání dat:

Načti etalon Načti obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu: 0.1

Save
scratches1



Parametry

Předzatížení: 29.42 N
Zatížení: 147.1 N
Rychlost indentora: 880 mm/s
Poznámky:

Počet změřených průměrů: 3

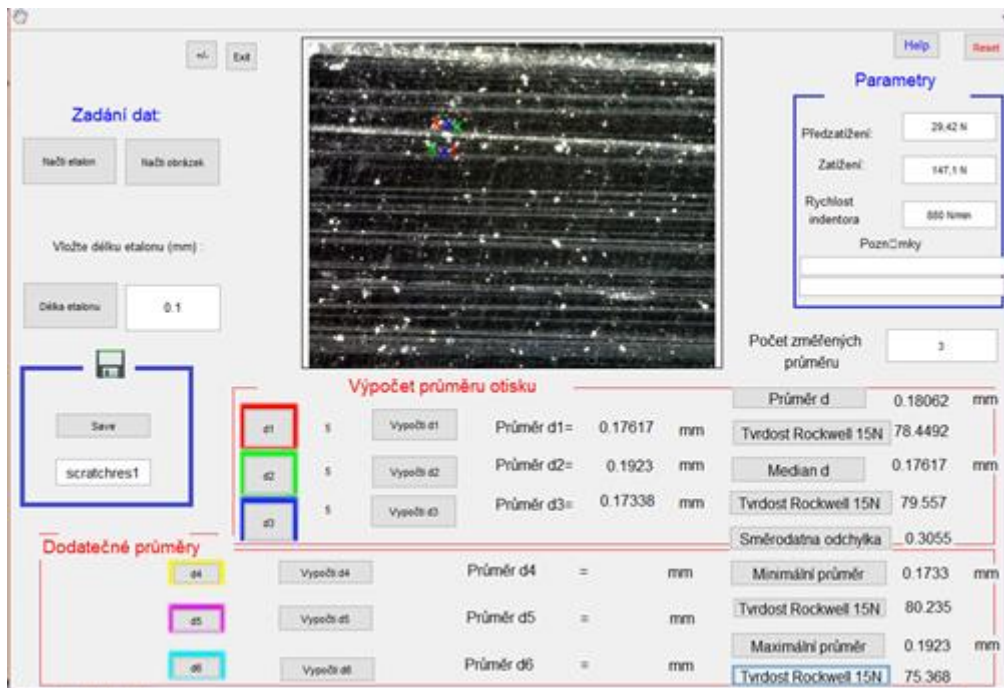
Výpočet průměru otisku

d1	4	Vypočti d1	Průměr d1=	0.16857	mm
d2	4	Vypočti d2	Průměr d2=	0.1979	mm
d3	4	Vypočti d3	Průměr d3=	0.18684	mm

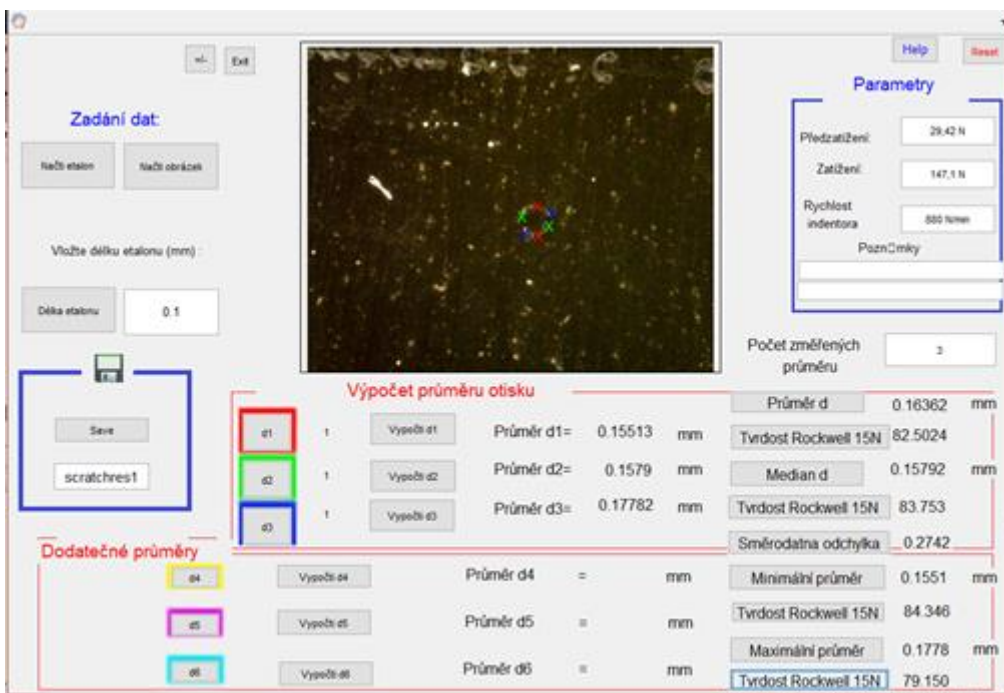
Dodatečné průměry

d4	Vypočti d4	Průměr d4 =	mm
d5	Vypočti d5	Průměr d5 =	mm
d6	Vypočti d6	Průměr d6 =	mm

Průměr d	0.18445	mm
Tvrdost Rockwell 15N	77.467	
Median d	0.18684	mm
Tvrdost Rockwell 15N	76.840	
Směrodatná odchylka	0.3239	
Minimální průměr	0.1685	mm
Tvrdost Rockwell 15N	81.372	
Maximální průměr	0.1979	mm
Tvrdost Rockwell 15N	73.798	



Výsledky měření pro nitrid titanu a pět otisků



[-] Exit

Zadání dat:

Načítat etalon Načítat obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu: 0.1

Save
scratches1

Parametry

Předzátížení: 29.42 N
Zatížení: 147.5 N
Rychlost indentora: 800 mm/s
Poznámky

Počet změřených průměrů: 3

Výpočet průměru otisku

d1	2	Vypočít d1	Průměr d1=	0.16135 mm	Průměr d	0.17457 mm
d2	2	Vypočít d2	Průměr d2=	0.1721 mm	Tvrdost Rockwell 15N	79.9481
d3	2	Vypočít d3	Průměr d3=	0.19016 mm	Median d	0.17219 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	83.753
					Směrodatná odchylka	0.2988
					Minimální průměr	0.1613 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	83.007
					Maximální průměr	0.1901 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	75.954

Dodatečné průměry

d4	Vypočít d4	Průměr d4 =	mm
d5	Vypočít d5	Průměr d5 =	mm
d6	Vypočít d6	Průměr d6 =	mm

[-] Exit

Zadání dat:

Načítat etalon Načítat obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu: 0.1

Save
scratches1

Parametry

Předzátížení: 29.42 N
Zatížení: 147.5 N
Rychlost indentora: 800 mm/s
Poznámky

Počet změřených průměrů: 3

Výpočet průměru otisku

d1	3	Vypočít d1	Průměr d1=	0.14981 mm	Průměr d	0.15792 mm
d2	3	Vypočít d2	Průměr d2=	0.1613 mm	Tvrdost Rockwell 15N	83.7534
d3	3	Vypočít d3	Průměr d3=	0.16259 mm	Median d	0.16135 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	83.007
					Směrodatná odchylka	0.2795
					Minimální průměr	0.1498 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	85.443
					Maximální průměr	0.1625 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	82.732

Dodatečné průměry

d4	Vypočít d4	Průměr d4 =	mm
d5	Vypočít d5	Průměr d5 =	mm
d6	Vypočít d6	Průměr d6 =	mm

[-] [Exit]

Zadání dat

Načti etalon Načti obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu 0.1

Save

scratches1

Parametry

Předzátížení: 29.42 N

Zatížení: 147.1 N

Rychlost indentora: 800 N/mm

Poznámky

Počet změřených průměrů: 3

Výpočet průměru otisku

d1	4	Vypočti d1	Průměr d1=	0.15489 mm	Průměr d	0.15121 mm
d2	4	Vypočti d2	Průměr d2=	0.1468 mm	Tvrdost Rockwell 15N	85.1591
d3	4	Vypočti d3	Průměr d3=	0.15188 mm	Median d	0.15188 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	85.021
					Směrodatná odchylka	0.2631

Dodatečné průměry

d4	Vypočti d4	Průměr d4 =	mm	Minimální průměr	0.1468 mm	
d5	Vypočti d5	Průměr d5 =	mm	Tvrdost Rockwell 15N	86.030	
d6	Vypočti d6	Průměr d6 =	mm	Maximální průměr	0.1548 mm	
					Tvrdost Rockwell 15N	84.397

[-] [Exit]

Zadání dat

Načti etalon Načti obrázek

Vložte délku etalonu (mm):

Délka etalonu 0.1

Save

scratches1

Parametry

Předzátížení: 29.42 N

Zatížení: 147.1 N

Rychlost indentora: 800 N/mm

Poznámky

Počet změřených průměrů: 3

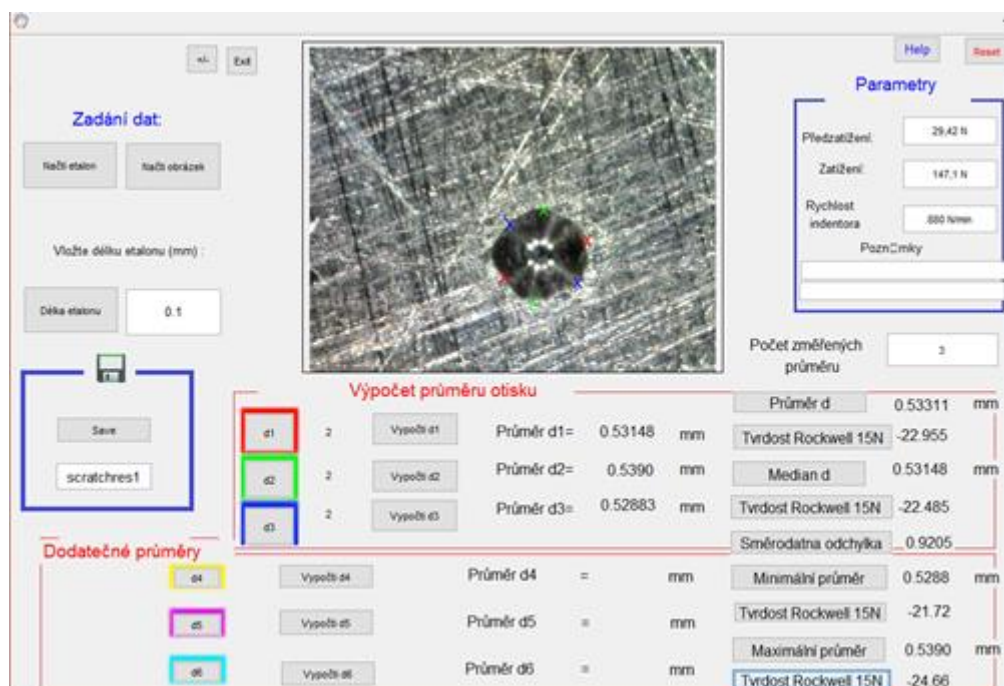
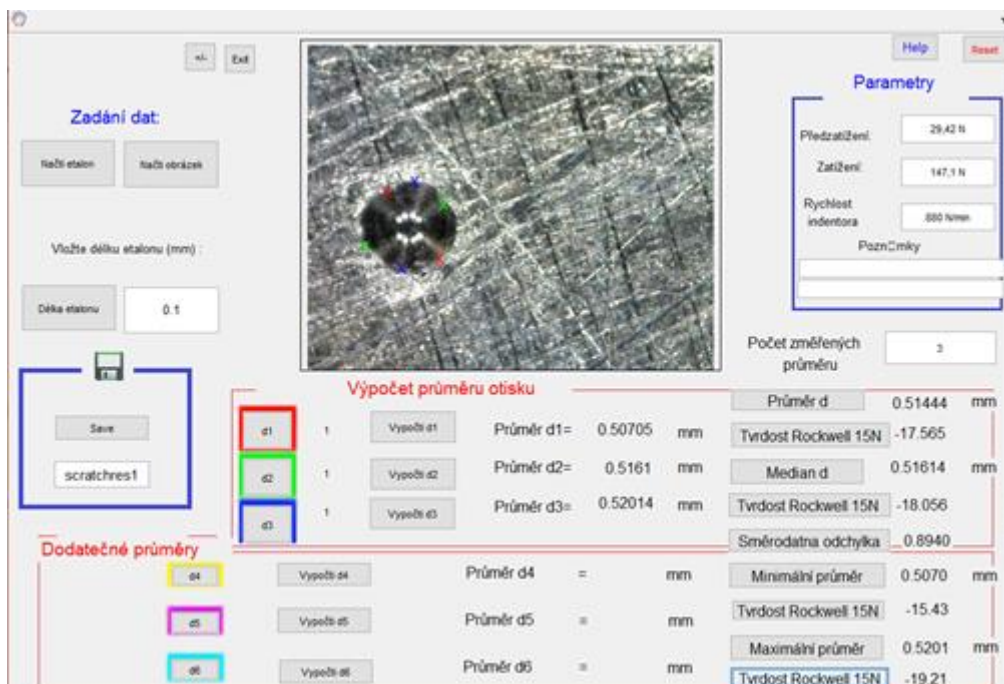
Výpočet průměru otisku

d1	5	Vypočti d1	Průměr d1=	0.13297 mm	Průměr d	0.15122 mm
d2	5	Vypočti d2	Průměr d2=	0.1608 mm	Tvrdost Rockwell 15N	85.157
d3	5	Vypočti d3	Průměr d3=	0.15988 mm	Median d	0.15988 mm
					Tvrdost Rockwell 15N	83.329
					Směrodatná odchylka	0.2773

Dodatečné průměry

d4	Vypočti d4	Průměr d4 =	mm	Minimální průměr	0.1329 mm	
d5	Vypočti d5	Průměr d5 =	mm	Tvrdost Rockwell 15N	88.625	
d6	Vypočti d6	Průměr d6 =	mm	Maximální průměr	0.1608 mm	
					Tvrdost Rockwell 15N	83.125

Výsledky měření pro hliník a pět otisků



Software interface for indentation analysis. The main window displays a grayscale image of a material surface with a central indentation. The interface is divided into several sections:

- Zadání dat:**
 - Načítání etalonu / Načítání obrázků
 - Vložte délku etalonu (mm): 0.1
 - Délka etalonu: 0.1
 - Buttons: Save, scratches1
- Parametry:**
 - Předzátížení: 29.42 N
 - Zatížení: 147.1 N
 - Rychlost indentora: 800 N/mm
 - Poznámky
 - Počet změřených průměrů: 3
- Výpočet průměru otisku:**

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d7
3	0.51832 mm	0.52257 mm	0.5311 mm	0.50128 mm	=	=	=	=
- Dodatečné průměry:**

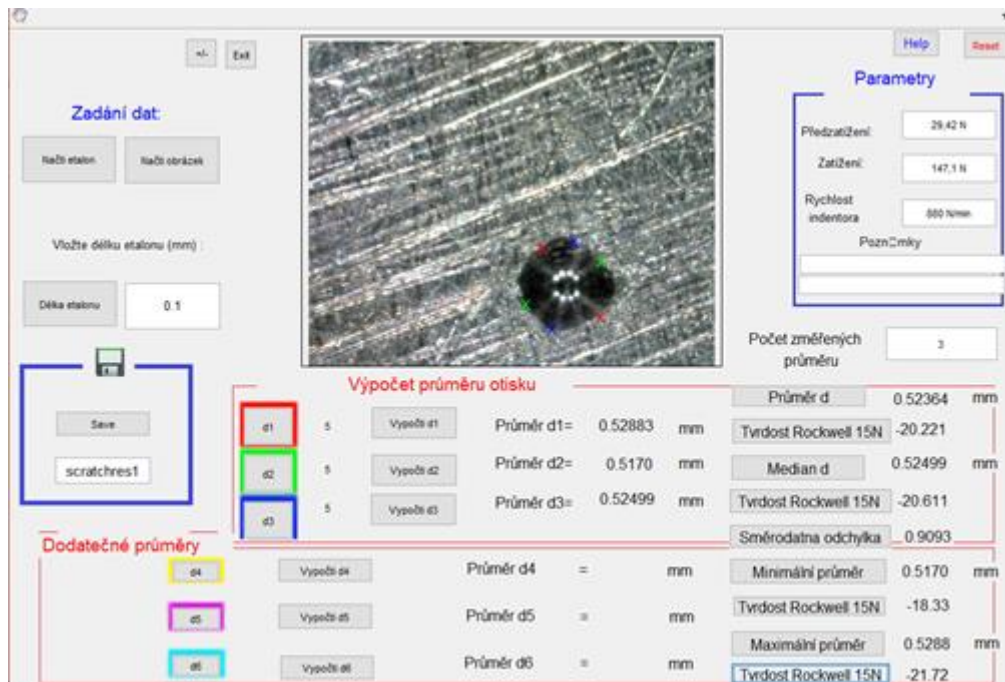
Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d7
3	0.51832 mm	0.52257 mm	0.5311 mm	0.50128 mm	=	=	=	=
- Summary Statistics:**
 - Tvrdość Rockwell 15N: -18.686
 - Median d: 0.52257 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -19.912
 - Směrodatná odchylka: 0.9054
 - Minimální průměr: 0.5012 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -13.76
 - Maximální průměr: 0.5311 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -22.37

Software interface for indentation analysis, showing a different set of measurements. The main window displays a grayscale image of a material surface with a central indentation. The interface is divided into several sections:

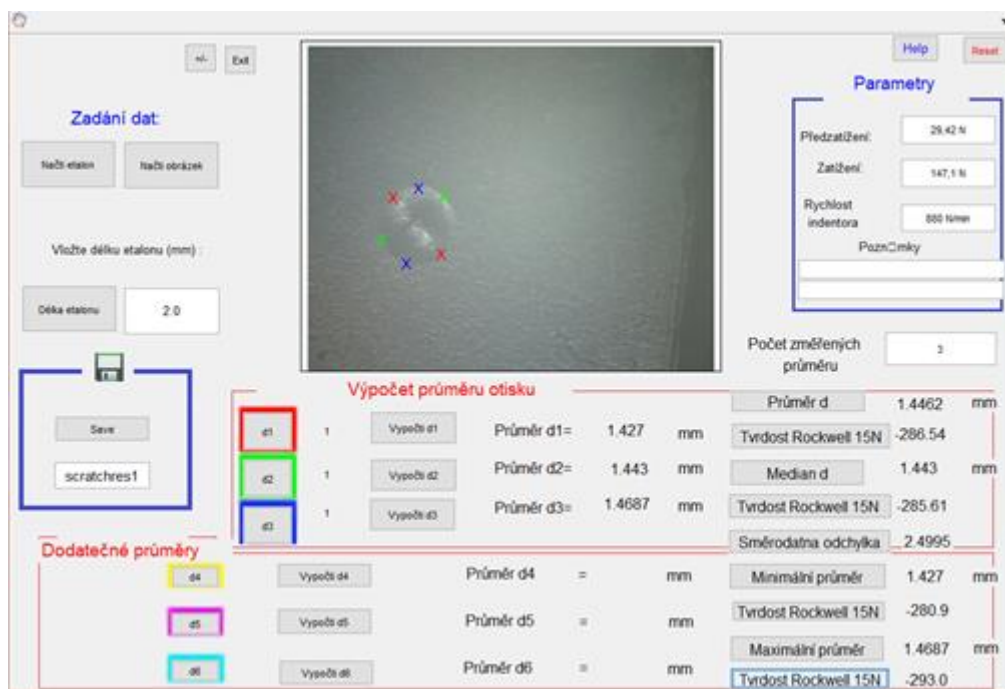
- Zadání dat:**
 - Načítání etalonu / Načítání obrázků
 - Vložte délku etalonu (mm): 0.1
 - Délka etalonu: 0.1
 - Buttons: Save, scratches1
- Parametry:**
 - Předzátížení: 29.42 N
 - Zatížení: 147.1 N
 - Rychlost indentora: 800 N/mm
 - Poznámky
 - Počet změřených průměrů: 3
- Výpočet průměru otisku:**

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d7
4	0.54558 mm	0.57734 mm	0.5739 mm	0.48546 mm	=	=	=	=
- Dodatečné průměry:**

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d7
4	0.54558 mm	0.57734 mm	0.5739 mm	0.48546 mm	=	=	=	=
- Summary Statistics:**
 - Tvrdość Rockwell 15N: -26.555
 - Median d: 0.57393 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -34.739
 - Směrodatná odchylka: 0.9980
 - Minimální průměr: 0.4854 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -9.200
 - Maximální průměr: 0.5773 mm
 - Tvrdość Rockwell 15N: -35.72



Výsledky měření pro polymer a pět otisků



Software interface for indentation measurement. The window is titled "Zadání dat:" and includes a central image of an indentation with measurement points marked by 'X's.

Zadání dat:

- Našli etalon: Našli obrázek:
- Vložte délku etalonu (mm):
- Délka etalonu:

Parametry:

- Předzatižení:
- Zatížení:
- Rychlost indentora:
- Poznámky:
- Počet změřených průměrů:

Výpočet průměru otisku

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6
1	1.365	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178			
2	1.365	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178			
3	1.365	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178				1.3837	1.365	1.3682	1.4178			

Dodatečné průměry

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6
4																																			
5																																			
6																																			

Statistical Summary:

- Směrodatná odchylka: 2.3703
- Minimální průměr: 1.365 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -268.49
- Median d: 1.3682 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -264.02
- Maximální průměr: 1.4178 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -278.3

Software interface for indentation measurement. The window is titled "Zadání dat:" and includes a central image of an indentation with measurement points marked by 'X's.

Zadání dat:

- Našli etalon: Našli obrázek:
- Vložte délku etalonu (mm):
- Délka etalonu:

Parametry:

- Předzatižení:
- Zatížení:
- Rychlost indentora:
- Poznámky:
- Počet změřených průměrů:

Výpočet průměru otisku

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6
1	1.4344	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313			
2	1.4344	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313			
3	1.4344	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313				1.4644	1.4344	1.4274	1.5313			

Dodatečné průměry

Průměr	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	
4																																				
5																																				
6																																				

Statistical Summary:

- Směrodatná odchylka: 2.4863
- Minimální průměr: 1.4274 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -291.79
- Median d: 1.4344 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -283.13
- Maximální průměr: 1.5313 mm
- Tvrdość Rockwell 15N: -311.1

Software interface for indentation measurement. The window is titled "Zadání dat" (Data Entry) and "Parametry" (Parameters).

Zadání dat:

- Načítání etalonu:
- Načítání obrázků:
- Vložte délku etalonu (mm):
- Délka etalonu:

Parametry:

- Předzátížení:
- Zatížení:
- Rychlost indentora:
- Poznámky:
- Počet změřených průměrů:

Výpočet průměru otisku

Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Směrodatná odchylka	Minimální průměr	Maximální průměr	Tvrdość Rockwell 15N
1.5159 mm	1.543 mm	1.4733 mm	1.5313 mm	= mm	= mm	= mm	2.6529	1.4733 mm	1.543 mm	-306.66

Dodatečné průměry

Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Tvrdość Rockwell 15N
= mm	= mm	= mm	-294.3
= mm	= mm	= mm	-314.4

Software interface for indentation measurement, showing a different set of data.

Zadání dat:

- Načítání etalonu:
- Načítání obrázků:
- Vložte délku etalonu (mm):
- Délka etalonu:

Parametry:

- Předzátížení:
- Zatížení:
- Rychlost indentora:
- Poznámky:
- Počet změřených průměrů:

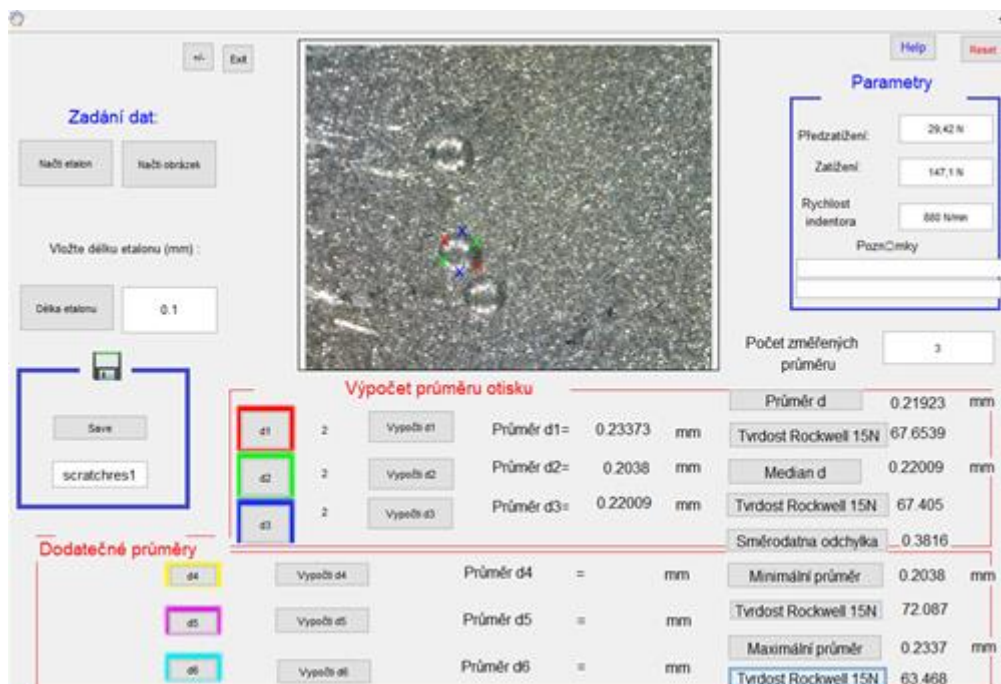
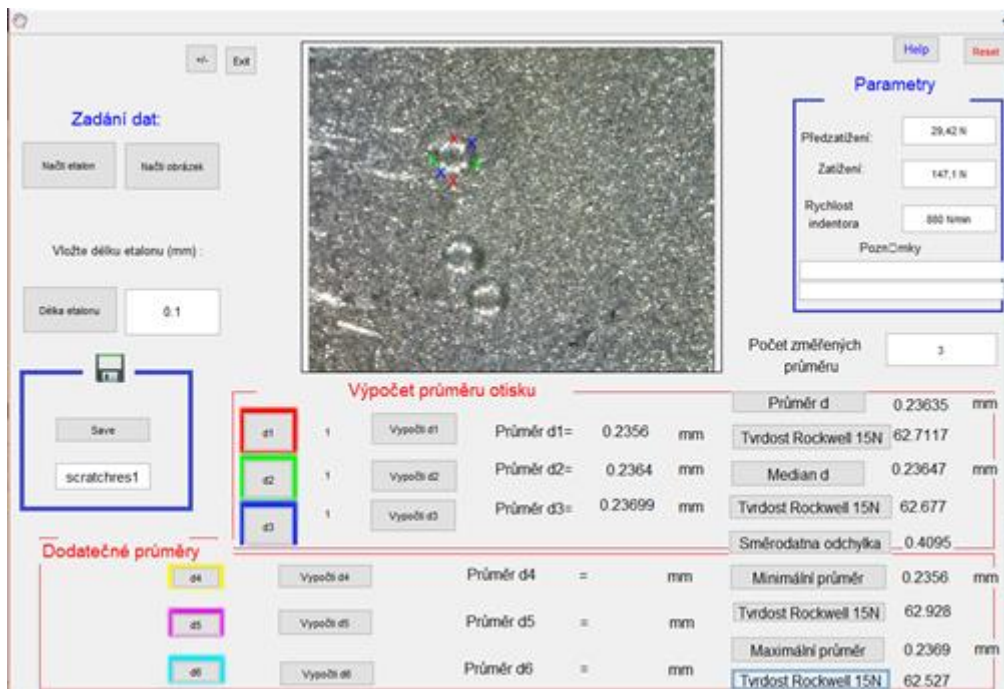
Výpočet průměru otisku

Průměr d	Průměr d1	Průměr d2	Průměr d3	Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Směrodatná odchylka	Minimální průměr	Maximální průměr	Tvrdość Rockwell 15N
1.5159 mm	1.4389 mm	1.3682 mm	1.4628 mm	= mm	= mm	= mm	2.4933	1.3682 mm	1.4628 mm	-284.43

Dodatečné průměry

Průměr d4	Průměr d5	Průměr d6	Tvrdość Rockwell 15N
= mm	= mm	= mm	-264.0
= mm	= mm	= mm	-291.3

Výsledky měření pro titan a pět otisků



Software interface for Rockwell hardness measurement. The main window displays a central image of a specimen with three circular indentations marked with red, green, and blue circles. The interface is divided into several sections:

- Zadání dat:** Includes buttons for "Načti etalon" and "Načti obrázek", a field for "Vložte délku etalonu (mm)" with a value of 0.1, and a "Délka etalonu" field with a value of 0.1. There are also "Save" and "scratches1" buttons.
- Parametry:** A panel on the right containing:
 - Předzatžení: 29.42 N
 - Zatížení: 147.1 N
 - Rychlost indentora: 800 mm/s
 - Poznámky: (empty field)
 - Počet změřených průměrů: 3
- Výpočet průměru otisku:** A table showing the calculation of the average diameter for three indentations:

Indentation	Count	Průměr d	Průměr d
d1	3	Průměr d1=	0.21178 mm
d2	3	Průměr d2=	0.2373 mm
d3	3	Průměr d3=	0.2044 mm
- Dodatečné průměry:** A section for additional measurements:

Indentation	Count	Průměr	Value
d4		Průměr d4 =	mm
d5		Průměr d5 =	mm
d6		Průměr d6 =	mm
- Summary Statistics:** A table on the right side of the main data table:

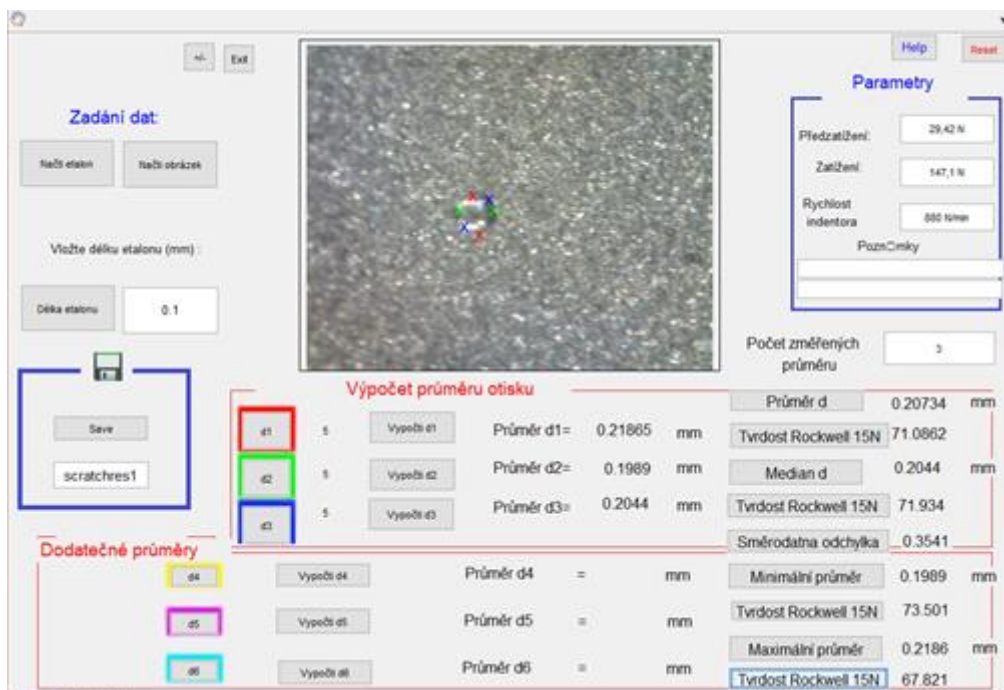
Průměr d	0.21786 mm
Tvrdost Rockwell 15N	68.0493
Median d	0.21178 mm
Tvrdost Rockwell 15N	69.804
Směrodatná odchylka	0.3677
Minimální průměr	0.2044 mm
Tvrdost Rockwell 15N	71.934
Maximální průměr	0.2373 mm
Tvrdost Rockwell 15N	62.411

Software interface for Rockwell hardness measurement, showing a second set of data. The layout is identical to the first image, but with different values:

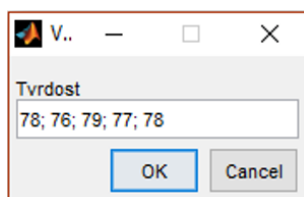
- Zadání dat:** Same as the first image.
- Parametry:** Same as the first image.
- Výpočet průměru otisku:**

Indentation	Count	Průměr d	Průměr d
d1	4	Průměr d1=	0.22089 mm
d2	4	Průměr d2=	0.2265 mm
d3	4	Průměr d3=	0.22083 mm
- Dodatečné průměry:** Same as the first image.
- Summary Statistics:**

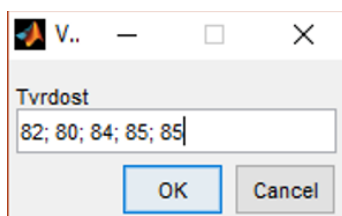
Průměr d	0.22277 mm
Tvrdost Rockwell 15N	66.6319
Median d	0.22089 mm
Tvrdost Rockwell 15N	67.174
Směrodatná odchylka	0.3826
Minimální průměr	0.2208 mm
Tvrdost Rockwell 15N	67.192
Maximální průměr	0.2265 mm
Tvrdost Rockwell 15N	65.529



Příloha č. 5 Výsledné tabulky konverze tvrdostí měřených materiálů



	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	78	48.5818	391.2356	570.4040	375.0292	325.6628
2	76	44.5492	357.6664	536.7660	378.4952	295.6952
3	79	50.7352	410.2009	587.9685	373.4480	342.6227
4	77	46.5198	373.7241	553.3365	376.7116	310.0203
5	78	48.5818	391.2356	570.4040	375.0292	325.6628



	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	82	57.7438	475.8196	643.6440	369.3116	401.4068
2	80	52.9800	430.6200	606.0300	371.9680	360.9000
3	84	62.8732	526.8344	683.2460	367.0600	447.1832
4	85	65.5750	554.5225	703.7925	366.0860	472.0475
5	85	65.5750	554.5225	703.7925	366.0860	472.0475

V.. - □ ×

Tvrđost

-18; -23; -19; -27; -20

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	-18	267.4138	5.3395e+03	1.1982e+03	998.0116	4.8313e+03
2	-23	301.8898	5.9643e+03	1.3564e+03	1.0560e+03	5.3986e+03
3	-19	274.1262	5.4615e+03	1.2289e+03	1.0094e+03	4.9422e+03
4	-27	331.1158	6.4903e+03	1.4919e+03	1.1042e+03	5.8762e+03
5	-20	280.9300	5.5850e+03	1.2600e+03	1.0209e+03	5.0543e+03

V.. - □ ×

Tvrđost

63; 68; 68; 67; 71

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	63	27.2488	281.2121	366.5765	410.8912	229.3523
2	68	32.0748	281.5416	422.0940	396.4072	228.5208
3	68	32.0748	281.5416	422.0940	396.4072	228.5208
4	67	30.9268	278.5681	409.9965	399.1016	226.0523
5	71	36.0672	299.1849	461.3685	388.9312	243.8307

V.. - □ ×

Tvrđost

-287; -268; -291; -306; -307

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	-287	5.3677e+03	9.0575e+04	2.7356e+04	7.7118e+03	8.2131e+04
2	-268	4.7903e+03	8.1102e+04	2.4328e+04	6.9973e+03	7.3542e+04
3	-291	5.4934e+03	9.2637e+04	2.8017e+04	7.8669e+03	8.4000e+04
4	-306	5.9780e+03	1.0057e+05	3.0564e+04	8.4629e+03	9.1195e+04
5	-307	6.0110e+03	1.0111e+05	3.0738e+04	8.5035e+03	9.1686e+04

V.. - □ ×

Tvrđost

82.3; 79.6; 83.3; 83.0; 84.6

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	82.3000	58.4899	483.1011	649.4576	368.9481	407.9373
2	79.6000	52.0711	422.2779	598.7458	372.5479	353.4310
3	83.3000	61.0363	508.3177	669.1592	367.8020	430.5620
4	83	60.2628	500.6001	663.1965	368.1352	423.6363
5	84.6000	64.4833	543.2728	695.5143	366.4635	461.9437

V.. - □ ×

Tvrđost

78.0; 76.3; 77.3; 79.6; 78.3

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	78	48.5818	391.2356	570.4040	375.0292	325.6628
2	76.3000	45.1308	362.3311	541.6850	377.9495	299.8544
3	77.3000	47.1288	378.8249	558.4046	376.1963	314.5747
4	79.6000	52.0711	422.2779	598.7458	372.5479	353.4310
5	78.3000	49.2182	396.7725	575.6212	374.5442	330.6124

V.. - □ ×

Tvrđost

-17.3; -22.6; -18.3; -26.6; -20.3

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	-17.3000	262.7695	5.2549e+03	1.1771e+03	990.0935	4.7545e+03
2	-22.6000	299.0476	5.9129e+03	1.3433e+03	1.0513e+03	5.3520e+03
3	-18.3000	269.4179	5.3759e+03	1.2074e+03	1.0014e+03	4.8644e+03
4	-26.6000	328.1274	6.4366e+03	1.4780e+03	1.0993e+03	5.8275e+03
5	-20.3000	282.9890	5.6224e+03	1.2695e+03	1.0244e+03	5.0882e+03

V. - □ ×

Tvrđost
62.6; 67.3; 68.0; 70.0; 71.3

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	62.6000	26.9614	282.7558	362.6719	412.1592	230.8416
2	67.3000	31.2616	279.3075	413.5736	398.2827	226.6545
3	68	32.0748	281.5416	422.0940	396.4072	228.5208
4	70	34.6450	291.8500	447.7800	391.3220	237.4100
5	71.3000	36.5117	301.6689	465.5420	388.2337	246.0138

V. - □ ×

Tvrđost
-286.6; -301.6; -291.6; -306.3; -279.6

OK Cancel

	HR	HS	HV	HK	HL	HB
1	-286.6000	5.3552e+03	9.0371e+04	2.7291e+04	7.6964e+03	8.1945e+04
2	-301.6000	5.8337e+03	9.8211e+04	2.9805e+04	8.2857e+03	8.9054e+04
3	-291.6000	5.5124e+03	9.2948e+04	2.8117e+04	7.8903e+03	8.4282e+04
4	-306.3000	5.9879e+03	1.0074e+05	3.0616e+04	8.4751e+03	9.1342e+04
5	-279.6000	5.1389e+03	8.6824e+04	2.6156e+04	7.4292e+03	7.8729e+04

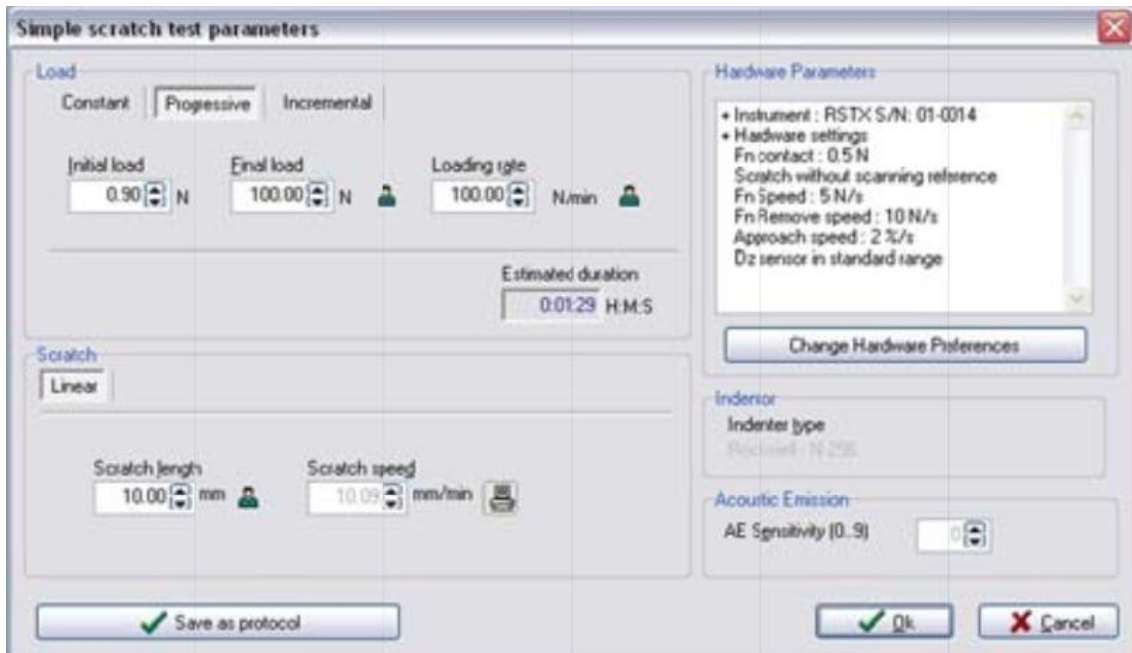


České vysoké učení technické v Praze
Fakulta biomedicínského inženýrství

Návod pro měření a vyhodnocení dat pro určení tvrdosti z přístroje Revetest Xpress

1. Postup měření tvrdosti

1. Zvolte a nastavte podmínky měření pro skratch tester na vašem počítači. Rychlost posunu hrotu volte 0.



2. Přeneste data protokolu z PC přes USB kabel do Revetest Xpressu.



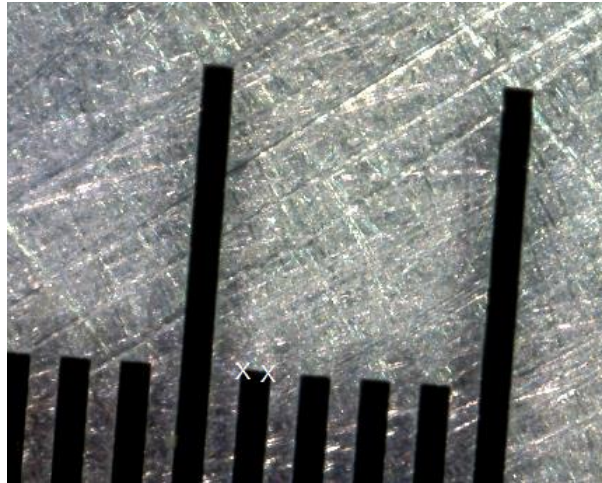
3. Stiskněte tlačítko start pro zahájení testu.



2. Postup vyhodnocení dat

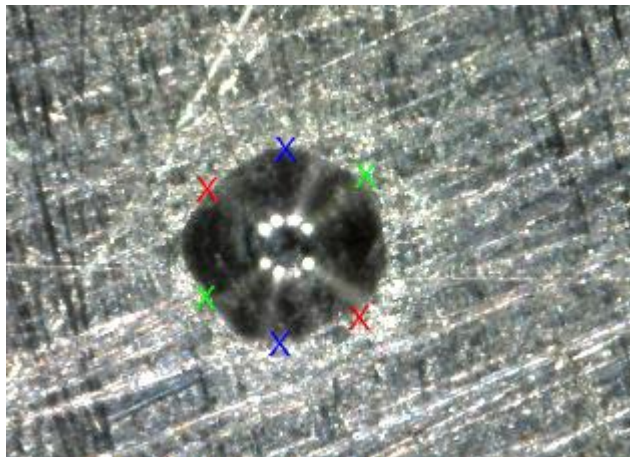
1. Stiskni tlačítko «Načti etalon» (obr. 1,č.1)

2. Stiskni tlačítko «Délka etalonu» a zvolit pomocí myši délku jednoho dílku (obr. 1,č.3)



3. Stiskni tlačítko «Načti odrázek» (obr. 1,č.2)

4. Zvolit pomocí myši délky průměrů otisku pomocí tlačítek «d1», «d2» a «d3» (obr. 1,č.5)



5. Zvolte počet změřených průměrů, tj. počet odečítání průměru, zapsáním čísla do vhodného řádku (obr. 1,č.18)

6. Stisknutím tlačítek «Vypočti d1», «Vypočti d2» a «Vypočti d3» vypočítáme velikosti průměrů (obr. 1, č.6,7,8)

7. Stisknutím tlačítka «Průměr d» vypočteme aritmetický průměr změřených průměrů otisku (obr. 1, č.9)

8. Vypočet hodnoty tvrdosti realizujeme pomocí tlačítka «Tvrдост Rockwell 15N» (obr. 1,č.10)

9. Tlačítko «Medián» je pro výpočet mediánu změřených průměrů (obr. 1,č.11)

10. Pro výpočet tvrdosti z mediánu, musíte zmáčknout tlačítko níže «Tvrдост Rockwell 15N» (obr. 1,č.12)

11. Pro výpočet směrodatné odhylek průměrů stiskneme tlačítko «Směrodatná odchylka» (obr. 1, č.13)
12. Zmačknutím tlačítka «Minimální průměr», SW nám ukaže hodnotu minimálního průměru. Pro výpočet tvrdosti z této hodnoty, musíme použít tlačítko níže «Tvrdost Rockwell 15N» (obr. 1, č.14,15)
13. Zmačknutím tlačítka «Maximální průměr», SW nám ukaže hodnotu maximálního průměru. Pro výpočet tvrdosti z této hodnoty, musíme použít tlačítko níže «Tvrdost Rockwell 15N» (obr. 1, č.16,17)
14. Tlačítkem «Save» můžeme uložit data ve formě protokolu z měření. (obr. 1, č.4)
15. Při potřebě zvolení dodatečných průměrů musíme pomocí myši určit délky průměrů otisku pomocí tlačítek «d4», «d5» a «d6» (obr. 1, č.22)
16. Stisknutím tlačítek «Vypočti d4», «Vypočti d5» a «Vypočti d6» výpočtáme velikosti dodatečných průměrů (obr. 1, č.19,20,21)



Obrázek 1: Umístění tlačítek