



Vliv velikosti zatížení na výsledek zkoušky dle Vickerse

Bakalářská práce

Studijní program:

B0715A270008 Strojírenství

Autor práce:

Oldřich Pačesný

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.

Katedra strojírenské technologie





Zadání bakalářské práce

Vliv velikosti zatížení na výsledek zkoušky dle Vickerse

Jméno a příjmení: **Oldřich Pačesný**
Osobní číslo: S19000096
Studijní program: B0715A270008 Strojírenství
Zadávací katedra: Katedra strojírenské technologie
Akademický rok: **2021/2022**

Zásady pro vypracování:

1. Zkoušky tvrdosti kovových materiálů
2. Přehled pevnostních materiálů používaných v automobilovém průmyslu (DP ocele, CP ocele, HSLA, TRIP ocele, MS ocele)
3. Experimentální zjištění vlivu zatížení na výsledek zkoušky tvrdosti dle Vickerse pro zvolenou TRIP ocel
4. Statistické vyhodnocení naměřených dat
5. Závěr

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

obrázky, tabulky, grafy
cca 30 stran textu
tištěná/elektronická
Čeština



Seznam odborné literatury:

- [1] DAVIES, Geoffrey. Materials for Automobile Bodies. B.m.: Butterworth-Heinemann, 2012. ISBN 978-0-08-096979-4.
- [2] MARQUARD, Elizabeth a Heather LAMPMAN. ASM Handbook, Volume 14B: Metalworking: Sheet Forming. B.m.: ASM International, 2006. ISBN 0-87170-710-1.
- [3] NEUBAUER, Jiří, Marek SEDLAČÍK a Oldřich KŘÍŽ. Základy statistiky: aplikace v technických a ekonomických oborech. Praha: Grada, 2016. ISBN 978-80-247-5786-5.
- [4] ČSN EN ISO 6507-1 (420374) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Vickerse – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018.
- [5] ČSN EN ISO 6506-1 (420359) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Brinella – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015.
- [6] ČSN EN ISO 6508-1 (420360) Kovové materiály – Zkouška tvrdosti podle Rockwella – Část 1: Zkušební metoda. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017.

Vedoucí práce:

Ing. Jiří Sobotka, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Konzultant práce:

doc. Ing. Pavel Solfronk, Ph.D.
Katedra strojírenské technologie

Datum zadání práce:

30. listopadu 2021

Předpokládaný termín odevzdání:

30. května 2023

prof. Dr. Ing. Petr Lenfeld
děkan

L.S.

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

Prohlášení

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

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

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

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

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

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

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

19. května 2022

Oldřich Pačesný

Vliv velikosti zatížení na výsledek zkoušky dle Vickerse

Anotace:

Bakalářská práce se zabývá přehledem základních zkoušek používaných pro měření tvrdosti technických materiálů a charakteristikou materiálů se zvýšenými pevnostními hodnotami používaných v automobilovém průmyslu.

V rámci řešení bakalářské práce byl experimentálně zjištěn vliv zatížení na výsledek zkoušky tvrdosti dle Vickerse pro zvolenou vícefázovou TRIP ocel. Výsledky a závěry bakalářské práce byly formulovány na základě statistické metody analýzy rozptylu (ANOVA)

Klíčová slova:

Zkoušky tvrdosti, pevnostní materiály, statická zkouška tahem, analýza rozptylu

Influence of load size on Vickers test result

Annotation:

The bachelor thesis deals with an overview of basic tests used to measure the hardness of technical materials and the characteristics of materials with increased strength values used in the automotive industry.

As part of the bachelor's thesis, the effect of loading on the result of the Vickers hardness test for the selected multiphase TRIP steel was experimentally determined. The results and conclusions of the bachelor thesis were formulated on the basis of the statistical method of analysis of variance (ANOVA)

Key words:

Hardness tests, Strength materials, Static tensile test, Analysis of variance

Poděkování

Především děkuji celé mé rodině, která mě během studia neskutečně podporovala a dodávala mi potřebnou sílu a chuť do učení. Dále děkuji panu docentu Solfronkovi a paní Ing. Novákové za veškeré rady a poznatky při tvoření mé bakalářské práce.

Obsah

Seznam použitých zkratk	10
1 Úvod	11
2 Teoretická část	12
2.1 Zkoušky tvrdosti	12
2.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti	12
2.2.1 Vrypové zkoušky	13
2.2.2 Odrazové zkoušky	13
2.2.3 Vnikací zkoušky	14
a) Zkouška tvrdosti podle Brinella	14
b) Zkouška tvrdosti podle Rockwella	15
c) Zkouška tvrdosti podle Vickerse	16
2.3 Pevnostní materiály v automobilovém průmyslu	17
2.3.1 TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity)	17
2.3.2 DP ocele (Dual Phase)	18
2.3.3 CP ocele (Complex Phase)	19
2.3.4 MS ocele (Martensitic steel)	19
2.3.5 HSLA ocele (High Strength Low Alloy steels)	20
2.4 Srovnání vlastností vysokopevnostních materiálů	20
3 Praktická část	21
3.1 Postup měření	21
3.1.1 Charakteristika testovaného materiálu	21
3.1.2 Vystřihnutí vzorků	22
3.1.3 Statická zkouška tahem	23
3.1.4 Řezání vzorků	26
3.1.5 Lisování vzorků	27
3.1.6 Broušení vzorků	28
3.1.7 Měření tvrdosti vzorků	30
3.1.8 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° bez deformace	36
3.1.9 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° s 16% deformací	37
3.1.10 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° s 21% deformací	38
3.1.11 Graf – vzorek na plocho	39
3.2 Statistické vyhodnocení naměřených dat	40
3.2.1 Postup ověření a vyhodnocení výsledků	40
4 Závěr	43

Seznam použité literatury	44
Seznam příloh	46
Přílohy A.....	47
Příloha B.....	48
Příloha C.....	49
Příloha D.....	50
Příloha E	51

Seznam použitých zkratek

A_x = Tažnost [%]

A_g = Homogenní tažnost [%]

a_0 = Počáteční tloušťka vzorku [mm]

ANOVA = Analysis of variance

b_0 = Počáteční šířka vzorku [mm]

BH efekt = Bake Hardening

CP = Complex Phase

DP = Dual Phase

F = Zatěžující síla [N], testovací kritérium F-testu [-]

H_0 = Nulová hypotéza

H_1 = Alternativní hypotéza

HB = Tvrdost podle Brinella

HRW/HRB = Tvrdost podle Rockwella

HSLA = High Strength Low Alloy steels

HV = Tvrdost podle Vickerse

l_0 = Počáteční délka vzorku [mm]

MS = Martensitic steel

PC = Personal computer

R = Smluvní napětí [MPa]

R_e = Mez kluzu v tahu [MPa]

R_m = Mez pevnosti v tahu [MPa]

$R_{p0,2}$ = Smluvní mez kluzu v tahu [MPa]

S_0 = Počáteční průřez vzorku [mm²]

TRIP = Transformation Induced Plasticity

0° = Válcování ve směru vláken

90° = Válcování kolmo na vlákna

Δl = Prodloužení vzorku [mm]

ε = Poměrné prodloužení [1]

1 Úvod

Bakalářská práce se zabývá vlivem zatížení na výsledek zkoušky dle Vickerse. Celá práce je rozdělena do teoretické a praktické části, ve kterých jsou popsány prováděné činnosti, měření tvrdosti kovových materiálů, přehled materiálů používaných v oblasti automobilového průmyslu a vyhodnocení naměřených dat. V praktické části je popsán postup ke zjištění potřebných výsledků. Pro lepší pochopitelnost a čitelnost je většina informací doplněna obrázky a grafy.

Cílem práce je experimentálně zjistit, zda velikost zatížení má vliv na tvrdost zkoumaného materiálu. Zkoumaným materiálem je vícefázová TRIP ocel, která se využívá zejména v oblasti automobilového průmyslu. Pro zjištění výsledků byly použity laboratorní přístroje na katedře strojírenské technologie.

2 Teoretická část

Teoretická část zahrnuje obecné vysvětlení o zkouškách tvrdosti kovových materiálů a jejich rozdělení a přehled pevnostních materiálů využívaných v automobilovém průmyslu.

2.1 Zkoušky tvrdosti

Tvrdost vyjadřuje odolnost zkoumaného materiálu proti vniknutí cizího (zkušebního) tělesa do jeho povrchu. Dohromady s pevností, houževnatostí a pružností lze tvrdost zařadit mezi mechanické vlastnosti materiálu používaných ve strojírenství. [1]

U kovů se tvrdost zvyšuje kalením, kde podstata spočívá v ohřevu na kalící teplotu, výdrží na teplotě kalení a rychlým ochlazením. U velmi tvrdých materiálů je však nevýhodou jejich křehkost.

Tvrdost kovů se měří zařízeními, které lze pojmenovat jako tvrdoměry.

2.2 Rozdělení zkoušek tvrdosti

Zkoušky tvrdosti se dělí na zkoušky vrypové, odrazové a vnikací. Mezi nejpoužívanějšími způsoby se řadí zkoušky vnikací. Rozdělení zkoušek je vidět na (Obr. 2.1).

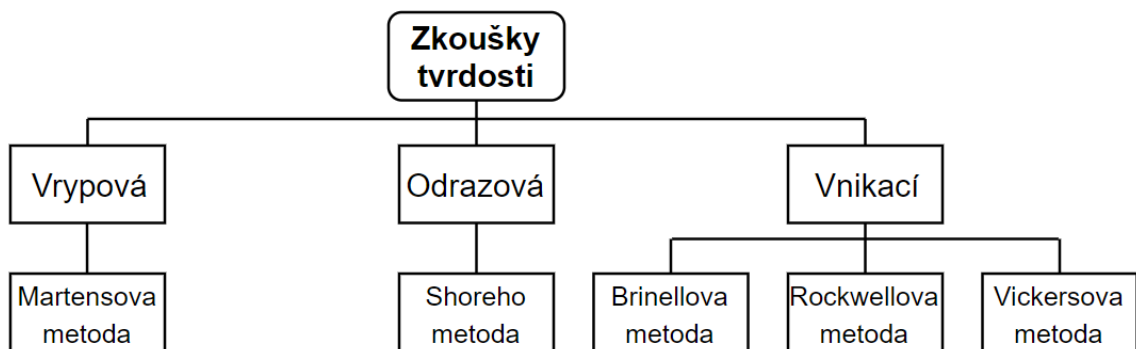
Dále se zkoušky tvrdosti mohou dělit na statické a dynamické.

- **Statické**

U statických zkoušek tvrdosti dochází k zatlačování zkušební tělesa v kolmém směru do zkoušeného povrchu. Typickým příkladem statických zkoušek jsou zkoušky vnikací, u kterých se zkušební těleso volí dle zvolené metody. [1]

- **Dynamické**

Na rozdíl od statických zkoušek se u dynamických zkoušek tvrdosti zkušební těleso dostává do zkoušeného materiálu rázem, proto se těmto zkouškám říká rázové. Mezi základní způsoby těchto zkoušek patří kladívko Poldi, které pracuje na principu srovnávací metody, kde se úderem kladívka vytvoří vtisky ve zkoušeném materiálu a srovnávací tyčince. Dle rozměrů vtisků se zjistí tvrdost. [1]



Obr. 2.1 Základní rozdělení zkoušek tvrdosti [Vlastní]

2.2.1 Vrypové zkoušky

Základem vrypové zkoušky je ostrý předmět, nejčastěji se jedná o diamantový kužel, který má vrcholový úhel 90° . Tento kužel je zatlačován do zkoušeného materiálu, do kterého vytváří vryp. Povrch zkoušeného materiálu musí být čistý a lesklý, aby se vzniklý vryp snadno změřil. Pro změření vrypu se využívá optický mikroskop. Míra tvrdosti se stanoví dle zatížení, ze kterého vznikne vryp o šířce 0,01 mm. Celý princip měření tvrdosti uvedl Martens, proto se daná metoda u vrypových zkoušek jmenuje Martensova. [1]

2.2.2 Odrázové zkoušky

Jedná se o dynamicko-elastickou zkoušku, při které se zkušební těleso pustí z výšky do zkoušeného materiálu a sleduje se jeho odraz od měřené plochy. Nárazem do měřené plochy ztratí zkušební těleso dostatek energie, a proto se neodrazí zpět do původní polohy (výšky). Pro zjištění tvrdosti se používá Shoreův skleroskop, na kterém je umístěna stupnice, ta uvádí hodnotu tvrdosti. Tato metoda se moc nepoužívá, jelikož není zcela spolehlivá. [2]

2.2.3 Vnikací zkoušky

Principem je zatlačování velmi tvrdého tělesa (zkušební tělesa) do materiálu. Zkušebními tělesy jsou kulička, kužel a jehlan. Velikost vytvořeného vtisku (průměr, hloubka, uhlopříčka) se na tvrdoměrech převede na tvrdost. [3]

Rozměry zkušebních těles a veškeré podmínky pro proces zkoušek lze stanovit příslušnými normami pro jednotlivé metody tvrdosti.

a) Zkouška tvrdosti podle Brinella

Principem Brinellové zkoušky je zatlačování zkušební tělesa (ocelové kalené kuličky – HBS) do zkoumaného materiálu (Obr. 2.2), který je dobré před změřením tvrdosti důkladně očistit a zbavit nečistot. [1]

Jedná se o nejstarší metodu pro měření tvrdosti, u které se zkoumá odpor materiálu vůči kuličce o určitém průměru. Průměry využívaných kuliček jsou 1; 2,5; 5; 10 mm. Zkouška se provádí dle normy ČSN EN ISO 6506-1 (420359). [4]

Použití ocelové kalené kuličky se provádí do 450 HB. V případech do 650 HB se využívá kulička z tvrdokovu – HBW. Po odlehčení se měří dva navzájem kolmé průměry vtisku d_1 a d_2 , ze kterých se vypočítá střední průměr $d_s = \frac{d_1 + d_2}{2}$. Průměry vtisku se mohou měřit dvěma způsoby, buď Brinellovým mikroskopem nebo optickým systémem. Metoda je vhodná především pro měkké a neželezné materiály (měď, hliník), šedou litinu apod. [5] [6]

Výpočet tvrdosti dle Brinella se provede pomocí následného vzorce, vychází se ze zatěžované síly a ploše vzniklého vtisku po zatlačení kuličkou. [6]

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

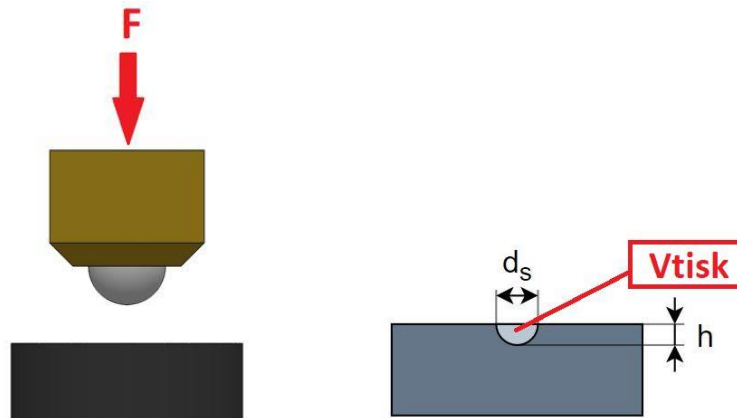
kde: F – Zatěžovací síla [kp]

S – Plocha vtisku [mm²]

D – Průměr kuličky [mm]

d_s – Střední průměr vtisku [mm]

h – hloubka vtisku [mm]



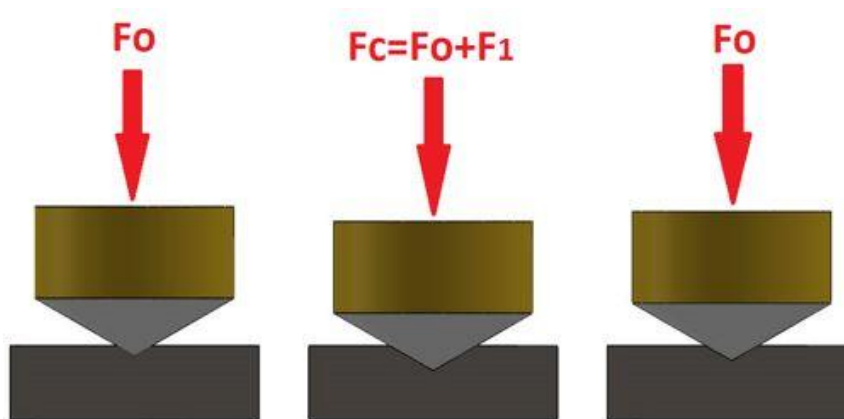
Obr. 2.2 Princip zkoušky dle Brinella [Vlastní]

b) Zkouška tvrdosti podle Rockwella

Principem Rockwellovy zkoušky je zatlačování diamantového kužele nebo kuličky do zkoumaného materiálu (Obr. 2.3). U diamantového kužele je velikost vrcholového úhlu 120° . [1]

Podstata měření primárně spočívá v předběžném zatížení (F_0) zkušební tělesa zatlačeného do materiálu. Předběžné zatížení se provádí proto, aby se minimalizoval účinek od povrchové úpravy materiálu. Změří se hloubka prvotního vtisku a přístroj pro měření (hloubkoměr) se vynuluje. Následně se materiál zatíží vlivem přídavného zatížení (F_1) a zkušební těleso vnikne do materiálu více hlouběji, zde se po určitou dobu (doba setrvání) nechá zkušební těleso působit na materiál a změří se hloubka vtisku po přídavném zatížení. Z tohoto plyne, že celkové zatížení (F_c) se skládá z předběžného a přídavného zatížení ($F_c = F_0 + F_1$). Na závěr dojde k odlehčení zpět na předběžné zatížení a může se změřit hloubka finálního vtisku dle stupnice na hloubkoměru. Zkouška je nařízena normou ČSN EN ISO 6508-1 (420360). [7] [8]

Metoda je jednou z nejpoužívanějších zkoušek tvrdosti. Obecně platí, že čím menší hloubka vtisku vznikne, tím tvrdší bude materiál. S tím souvisí i použití zkušebních těles, pro tvrdé materiály je vhodnější diamantový kužel (HRC), zatímco pro měkké materiály lze využít zatlačování kuličky (HRB). [7]



Obr. 2.3 Průběh zkoušky dle Rockwella [Vlastní]

c) Zkouška tvrdosti podle Vickerse

Podstatou měření je zatlačování diamantového čtyřbokého jehlanu, který má vrcholový úhel 136° do zkoumaného materiálu (Obr. 2.4). U vzniklých vtisků se stanoví jejich průměrná hodnota uhlopříček, ze kterých se dosáhne k tvrdosti materiálu. [1]

Mezi hlavní výhody Vickersovy metody patří univerzální použití pro širokou škálu materiálů, měření tvrdých a měkkých materiálů, přesná metoda měření, testování tvrdosti malých a tenkých součástí, měření mikrotvrdosti a povlaků, apod. Pro rychlejší a přesnější odměření se využívají novodobé softwary se zabudovanými mikroskopy nebo objektivy. Zkoušku lze provést dle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374). [9]

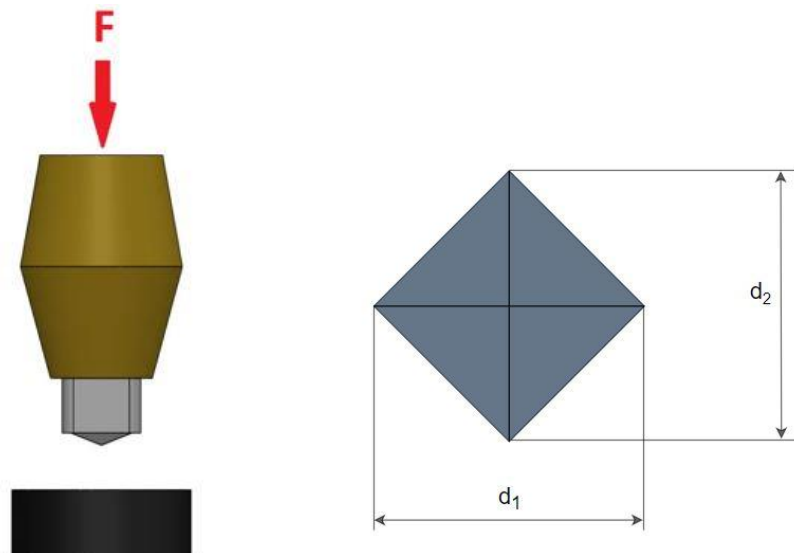
Mezi nevýhody této metody patří, že pro samotné měření musí být dobře opracovaný a hladký povrch zkoumaného materiálu, jelikož moderní tvrdoměry pracují na bázi stupních šedi. Na druhou stranu tyto tvrdoměry dokáží okamžitě změřit tvrdost bez jakéhokoliv počítání, díky tomu převyšují výhody této metody nad nevýhodami.

Výpočet tvrdosti dle Vickerse lze provést za pomoci následného vztahu, kde se vychází ze zatěžované síly a průměrné hodnoty změřených uhlopříček. [10]

$$HV = 0,189 \cdot \frac{F}{D^2} \quad (2)$$

kde: F – Zatěžovací síla [N]

D – Průměrná hodnota uhlopříček [mm]



Obr. 2.4 Princip zkoušky dle Vickerse [Vlastní]

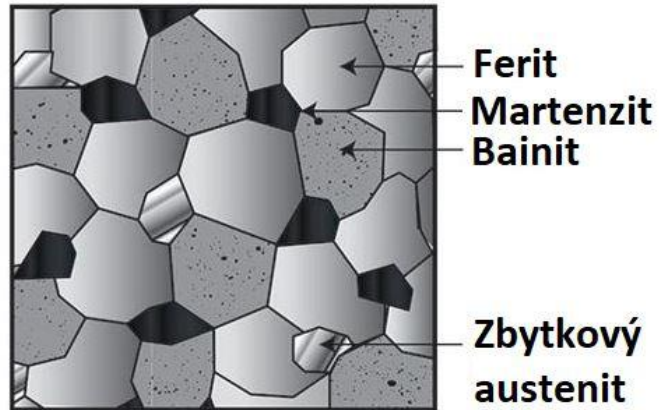
2.3 Pevnostní materiály v automobilovém průmyslu

Následuje rozdělení a stručné definice nepoužívanějších vysokopevnostních materiálů v oblasti automobilového průmyslu.

2.3.1 TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity)

V dnešní době se začaly používat ocele, které mají mimořádnou kombinaci pevnosti a tažnosti. Proto jsou tyto ocele vhodné pro konstrukčně složité díly uplatněné v automobilech, u kterých se sleduje hmotnost vozu (karoserie) a celková bezpečnost při přepravě pasažérů. Díky těmto důvodům se začaly využívat TRIP ocele (Transformation Induced Plasticity, oceli s transformačně indukovanou plasticitou). TRIP ocele mají vynikající deformační zpevnění, tzn. že během nárazu vozidla se ocel ještě více zpevní a dokáže pohltit energii ze srážky. Pevnost TRIP ocele se také zvyšuje vlivem lisování výlisků z plechů, tak i BH efektem (Bake Hardening) během lakování. [11]

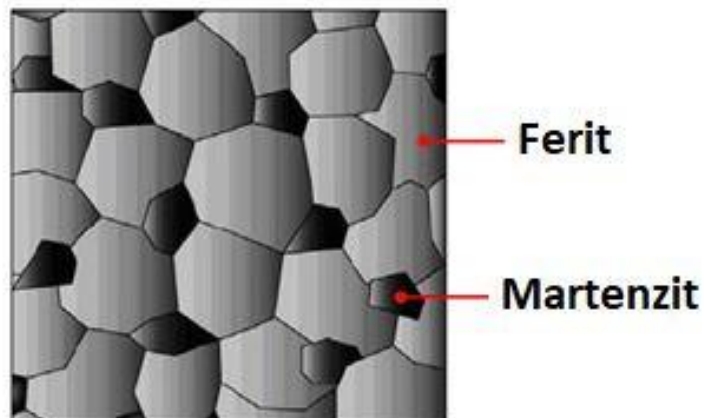
Vícefázová TRIP ocel se skládá ze struktury feritu, bainitu, martenzitu a zbytkového austenitu. Hladina deformace, při které dochází k přeměně austenitu na martenzit se dá řídit obsahem uhlíku v materiálu. Pokud je obsah uhlíku nízký, tak se austenit již během procesu tváření začne transformovat na martenzit, což způsobuje zpevnění už během procesu lisování. U vysokého obsahu uhlíku je austenit stabilní i po tváření a k transformaci austenitu na martenzit dochází až během následující deformace (příkladem je srážka automobilu). [12]



Obr. 2.5 Struktura TRIP ocele [13]

2.3.2 DP ocele (Dual Phase)

DP oceli se vyznačují vysokou pevností a tažností. Jejich struktura je tvořena dvěma fázemi, jednak feritickou (měkčí) fází a martenzitickou nebo bainitickou (tvrdší) fází. Díky martenzitu, který vznikl přeměnou ze zbytkového austenitu do formy malých ostrůvků ve feritické matici, je zaručena tvárnost (plasticita). Jelikož se jedná o vysokopevnostní ocele, tak jejich hodnota na mezi pevnosti v tahu se pohybuje v rozmezí 500–1200 MPa. Kvůli výborné absorpci energie jsou DP ocele válcované za studena i za tepla využívány v oblasti konstrukčních a bezpečnostních prvků v automobilovém průmyslu. Zejména pro tváření plechů u karosérií, výztuhy, podélné a příčné nosníky. [14]



Obr. 2.6 Struktura DP ocele [15]

2.3.3 CP ocele (Complex Phase)

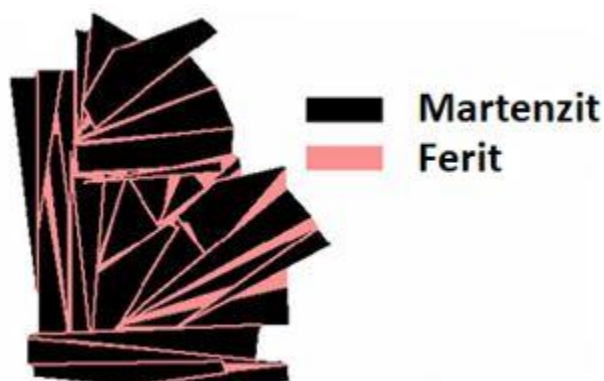
Mezi další vícefázové ocele patří CP oceli, které obsahují ve své jemnozrnné struktuře martenzit, bainit, ferit a austenit. Vysokého zjemnění zrna je docíleno mikrolegováním prvků niobem, titanem nebo vanadem. Přidáním těchto legur vznikne tzv. precipitační zpevnění. CP ocele se vyrábí válcováním za tepla i za studena. Pro ochranu proti korozi se využívá žárového zinkování povrchu. CP ocele se velmi dobře svařují i s jinými běžnými oceli. [16]



Obr. 2.7 Struktura CP ocele [17]

2.3.4 MS ocele (Martensitic steel)

Mikrostruktura MS ocele je tvořena z větší části martenzitem s malým množstvím feritu nebo bainitu. Struktury se dosáhne přeměnou austenitu na martenzit zakalením, po kterém následuje žihání a opětovné zakalení. MS ocele dosahují vysoké meze pevnosti v tahu (až 1700 MPa), tím se řadí mezi nejvýše postavené vícefázové ocele v rámci pevnosti. Nejen přidáním uhlíku do MS ocelí narůstá jejich kalitelnost, ale zvýšení kalitelnosti lze docílit i přidáním dalších prvků v různých kombinacích, například chromem, manganem, křemíkem, molybdenem, bórem, vanadem, niklem. Využití těchto ocelí se uplatňuje opět v bezpečnostních systémech automobilů (části předního a zadního nárazníku, střešní a prahové výztuhy, konstrukce sedadel). [14] [18]



Obr. 2.8 Struktura MS ocele [19]

2.3.5 HSLA ocele (High Strength Low Alloy steels)

Jedná se o vysokopevnostní nízkolegované oceli, které obsahují malé množství uhlíku a legujících prvků. Obsah uhlíku se pohybuje do 0,2 %, u přísad je to dohromady méně než 1,5 %. Z tohoto důvodu se HSLA ocelím říká mikrolegované, protože obsahují malá množství legur v porovnání s ostatními typy ocelí. Mezi legury patří mangan, chrom, nikl, molybden, měď, dusík, vanad, niob, titan, zirkonium. Přidáním legovacích prvků v malém množství vzniká široké spektrum mechanických vlastností, což činí jednu z velkých výhod této oceli. Přísadami zvýšit například mez v kluzu až na 600 MPa, proto se tato ocel používá zejména v osobních a nákladních automobilech. [20]

2.4 Srovnání vlastností vysokopevnostních materiálů

V následující tabulce (*Tab. 2.1*) jsou pro lepší přehlednost zobrazeny základní vlastnosti jednotlivých vysokopevnostních ocelí.

Tab. 2.1 Tabulka vlastností vysokopevnostních ocelí [21] [22]

Srovnávací tabulka	TRIP ocel	DP ocel	CP ocel	MS ocel	HSLA ocel
Mez pevnosti v tahu [MPa]	600–1000	500–1200	800–1050	až 1700	580–900
Mez kluzu [MPa]	400–700	až 780	680–700	950–1250	350–550
Tažnost A_{80mm} [%]	22–26	18–25	min. 10	min. 3	20–30

3 Praktická část

Praktická část předkládané bakalářské práce byla realizována s využitím laboratorních přístrojů umístěných na katedře strojírenské technologie TU v Liberci.

Hlavním cílem práce bylo experimentální zjištění vlivu zatížení na výsledek zkoušky tvrdosti dle Vickerse pro zvolený pevnostní materiál. Zkoumaným materiálem byla vícefázová TRIP ocel s označením RA-K 40/70, která se využívá zejména v oblasti automobilového průmyslu.

Jednotlivé kroky vedoucí k naplnění cílů bakalářské práce lze charakterizovat v těchto krocích:

- 1) Příprava vzorků
 - a) pro statickou zkoušku tahem
 - b) pro měření tvrdosti
- 2) Zjištění mechanických vlastností pomocí statické zkoušky tahem
- 3) Experimentální zjištění vlivu zatížení na výsledek zkoušky tvrdosti dle Vickerse v rozsahu zatížení 0,1 kg až 30 kg pro vzorky plechů bez deformace a s deformací 16% a 21%
- 4) Statistické vyhodnocení

Z naměřených hodnot byly sestrojeny grafy průběhů tvrdosti dle Vickerse v závislosti na zatížení a stupni deformace. Na závěr bakalářské práce byla na naměřeném souboru dat aplikována statistická metoda analýzy rozptylu za účelem ověření případného vlivu zatížení na výsledek zkoušky dle Vickerse.

3.1 Postup měření

3.1.1 Charakteristika testovaného materiálu

TRIP ocel s označením RA-K 40/70 je z oblasti materiálů RA–K (RestAustenit Stahl), jejichž výrobou se zabývá firma ThyssenKrupp. Pevnost těchto materiálů se pohybuje od 600 MPa do 1000 MPa. Výrobce stanovuje, že materiál RA-K 40/70 se může chlubit vysokopevnostními hodnotami, kde mez pevnosti v tahu dosahuje minimální velikosti 700 MPa při minimální hodnotě tažnosti 26 %. Díky těmto vlastnostem se používá pro vypínání a hluboké tažení. Pevnost této TRIP ocele se zvyšuje BH efektem. V následující tabulce (*Tab. 3.1*) je zobrazeno chemické složení této TRIP ocele. TRIP ocel se skládá ze

struktury feritu, bainitu (až 90 %), martenzitu a zbytkového austenitu (až 20 %). Během experimentu se použil testovaný vzorek o tloušťce $a_0 = 1,5$ mm. Pro tuto tloušťku je maximální šířka plechu 1600 mm. [23]

Tab. 3.1 Chemické složení materiálu RA-K 40/70 [23]

Prvek [max %]	C	Si + Al	Mn	S	P	Cr
RA-K 40/70	0,22	2,2	2	0,015	0,06	0,5

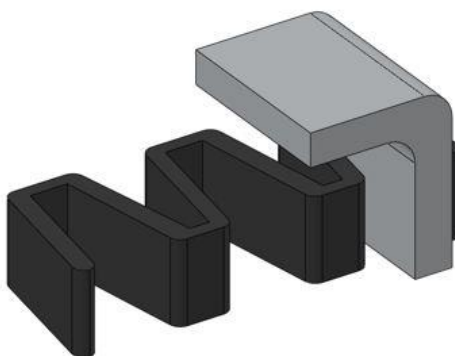
TRIP ocel s označením RA-K 40/70 se používá zejména v oblasti automobilového a leteckého průmyslu, kde jsou potřeba součásti z hlediska pevnosti a odolnosti proti vibracím a rázům. [23]

3.1.2 Vystříhnutí vzorků

Nejprve bylo zapotřebí nastříhat požadované vzorky vícefázové TRIP ocele z plechu o tloušťce 1,5 mm na tabulových nůžkách Durma MS 2504 (Obr. 3.2).

Vzorky byly nastříhány ve směru válcování (0°) a kolmo na směr válcování (90°) proto, aby bylo možné posoudit, zda směr válcování má vliv na velikost tvrdosti. Další vzorky byly nastříhány pro statickou zkoušku tahem, pro kterou se nastříhalo 8 vzorků. Celkem bylo nastříháno 11 vzorků vícefázové TRIP ocele pro následující měření.

U vystříženého vzorku pro měření na plocho bylo důležité z jedné strany provést ohyb o 90° , aby vzorek držel v plastové úchytce a mohl se snadno nalisovat (Obr. 3.1) při zhotovení metalografického vzorku.



Obr. 3.1 Ohyb o 90° u vzorku měřeného na plocho [Vlastní]



Obr. 3.2 Tabulové nůžky Durma MS 2504 [Vlastní]

3.1.3 Statická zkouška tahem

Jedná se o základní mechanickou zkoušku, ze které vychází řada konstrukčních uspořádání v oblasti strojírenství. Jde o lehce proveditelný experiment, který zajistí důležité informace ohledně pevnosti a mechanickém chování materiálu. Během testu se měří síla (F) působící na testovaný vzorek a prodloužení (Δl) vzorku, z těchto veličin lze dopočítat napětí (R) a poměrné prodloužení (ϵ). Základem pro tahovou zkoušku je vložení testovaného vzorku materiálu mezi čelisti přístroje. Poté se na vzorek začne působit zátěží a sleduje se změna délky vzorku. Jedna z čelistí drží materiál pevně, zatímco druhá zatěžovaná čelist táhne materiál a prodlužuje ho. Celý proces probíhá na trhačím stroji (*Obr. 3.4*). Díky této zkoušce se docílí toho, aby v praxi byly použity konstrukční materiály na správném místě z hlediska namáhání. Z tohoto pohledu je provádění tahových zkoušek jednoznačnou nutností. [24] [25]

V praktické části se statická zkouška tahem provedla proto, aby se zjistilo, zda deformovatelné vzorky mají výraznější vliv na tvrdost vícefázové TRIP ocele. Takže došlo k překročení pružných deformací a nastaly deformace plastické (trvalé). Pro porovnání vzorků s 0° a 90° se vytvořil tahový diagram (*Obr. 3.3*), ve kterém byla zvolena více jak 20% deformace. Výsledky obou deformací jsou znázorněny v přílohách.

Z naměřených hodnot síly (F) a prodloužení (Δl) bylo možné dopočítat velikost smluvního napětí (R) a poměrného prodloužení (ε), z těchto veličin lze sestavit tahový diagram.

Výpočet smluvního napětí R:

$$R = \frac{F}{S_0} \text{ [MPa]} \quad (3)$$

Počáteční průřez zkušební vzorku S_0 :

$$S_0 = a_0 \cdot b_0 \text{ [mm}^2\text{]} \quad (4)$$

kde: a_0 – počáteční tloušťka vzorku [mm]

b_0 – počáteční šířka vzorku [mm]

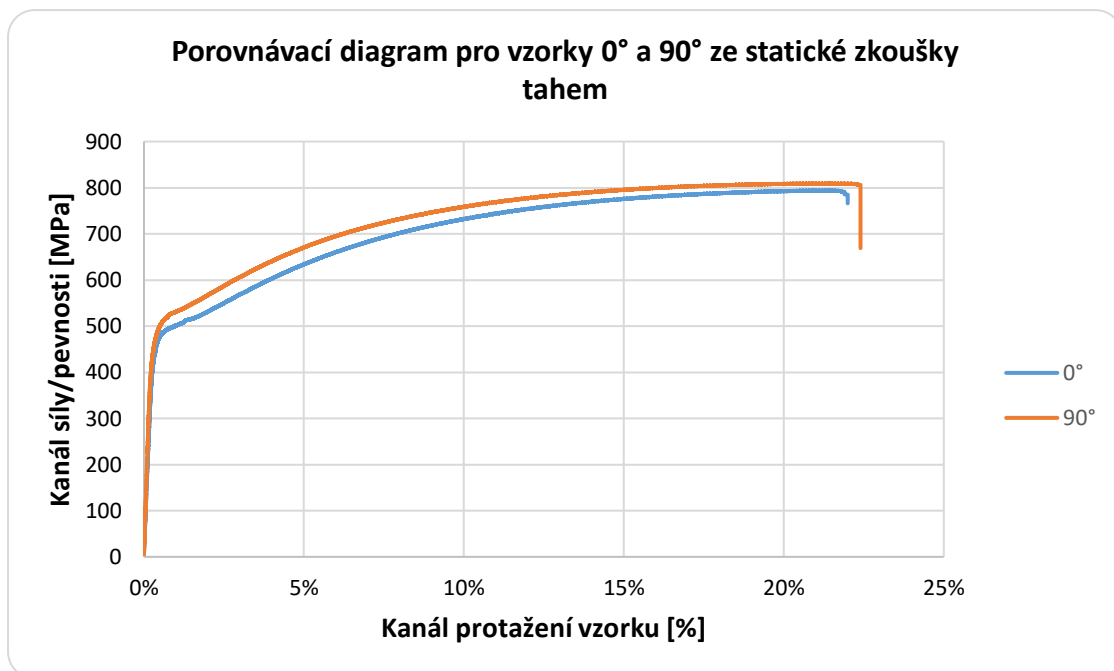
Výpočet poměrného prodloužení ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \text{ [1]} \quad (5)$$

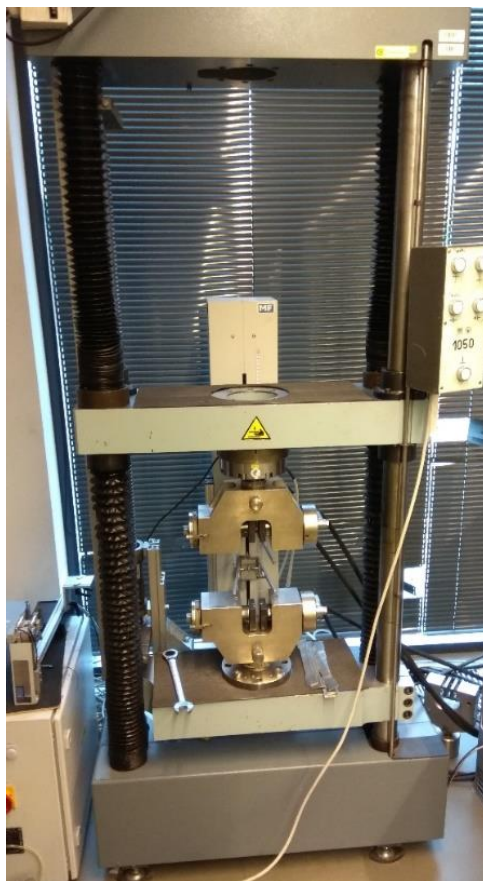
Průměrné naměřené hodnoty mechanických vlastností pro směr 0° a 90° jsou vidět v tabulce (Tab. 3.2). Grafické vyjádření průběhů tahových diagramů je vidět na (Obr. 3.3). Protokoly naměřených hodnot jsou uvedeny v příloze (Příloha A, Příloha B).

Tab. 3.2 Průměrné naměřené hodnoty mechanických vlastností [Vlastní]

Vzorek	$R_{p0,2}$	R_m	A_g	A_{50mm}
	MPa	MPa	%	%
Směr 0°	476,15 ± 0,96	796,01 ± 1,69	20,6 ± 0,43	21,49 ± 0,44
Směr 90°	488,6 ± 1,07	806,64 ± 1,95	21,1 ± 0,11	22,05 ± 0,12



Obr. 3.3 Smluvní tahový diagram pro vzorky 0° a 90° [Vlastní]



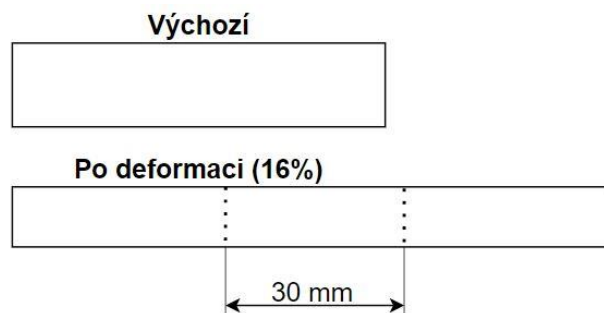
Obr. 3.4 Ukázka trhacího stroje [Vlastní]

3.1.4 Řezání vzorků

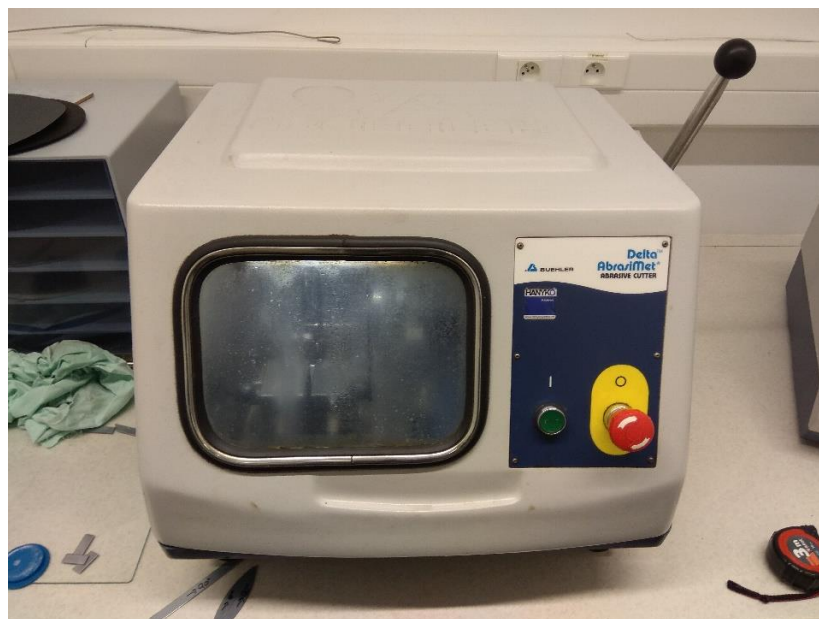
Další úpravou vystřižených a deformovatelných vzorků byla jejich rozměrová velikost. Ta se provedla na řezacím stroji Delta AbrasiMet od výrobce Buehler (*Obr. 3.6*).

Vzorky bylo důležité nařezat tak, aby se vešly do lisovacího stroje, tzn. na délku necelé 3 cm a na výšku 1 cm. U vzorků po statické zkoušce tahem se odřízla pouze jejich protažená (deformovatelná) část, která byla od středu vzorku na každou stranu přibližně 1,5 cm s výškou 1 cm, jak je znázorněno na (*Obr. 3.5*).

Vzorky na plocho řezání nepodstoupily, jelikož byly vystřižnuty dle požadovaných rozměrů kvůli ohybu o 90°, ostatní vzorky bylo nutné nařezat.



Obr. 3.5 Naznačení vyříznuté části u deformovatelných vzorků [Vlastní]



Obr. 3.6 Řezací stroj Delta AbrasiMet [Vlastní]

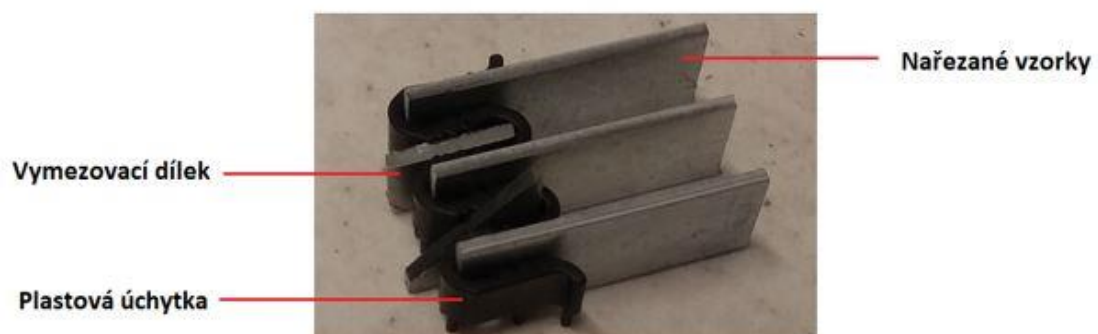
3.1.5 Lisování vzorků

Nařezané vzorky se poté mohly zalisovat. Vzorky bylo nutné nejprve připevnit do plastových úchytek, které zajišťují stálost a nehybnost vzorku během lisování. I přesto se stávalo, že se vzorek během lisování trochu pootočil a nebyl kolmo k povrchu, proto se mezi plastové úchytky vkládaly kousky ocele pouze pro vymezení a soudržnost vzorků. Vzorky se lisovaly na výšku (Obr. 3.7), aby byl vyloučen vliv tloušťky u měření tvrdosti. Kolmost vzorků bylo důležité dodržet, jinak by měření tvrdosti nemělo význam.

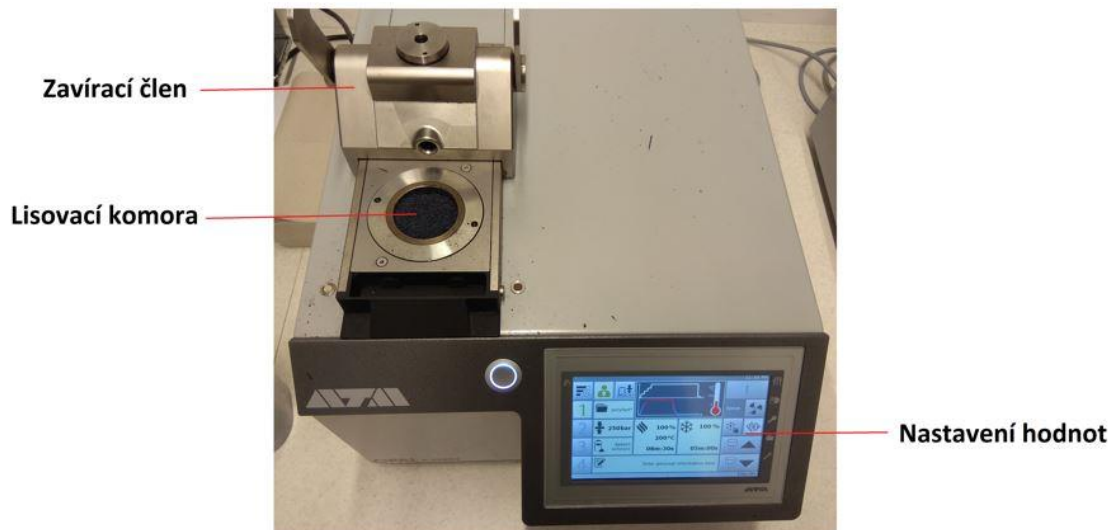
U vzorku na plocho bylo vkládání do plastových úchytek zobrazeno již na (Obr. 3.1). Lisování probíhalo stejně jako u ostatních vzorků.

Pro samotný proces byl zapotřebí modulární metalografický lis OPAL X-PRESS (Obr. 3.8), do kterého se vzorky umístily a následně byly zasypány až po okraj lisovací komory práškem ze speciálního polymeru, který se při vyšší teplotě roztaví a za pomoci tlaku obklopí zkoumaný materiál.

Po vyjmutí se zalisovaný vzorek (Obr. 3.9) očistí a zbaví potenciálních otřepů, eventuálně se z dolní strany mohou gravírovacím perem napsat důležité informace ohledně vzorku a následně se může přejít k broušení.



Obr. 3.7 Nařezané vzorky umístěny do plastové úchytky [Vlastní]



Obr. 3.8 Metalografický lis OPAL X-PRESS [Vlastní]



Obr. 3.9 Zalisovaný vzorek TRIP ocele [Vlastní]

3.1.6 Broušení vzorků

Zalisované vzorky je třeba důkladně zabrousit, aby jejich povrch byl připravený na měření tvrdosti, protože čím kvalitnější povrch, tím snadněji se bude měření tvrdosti provádět. Nejdříve se povrch vzorku zbrousil hrubým brusným papírem po dobu 40 vteřin, následně se použilo jemnějších brusných papírů až do zrnitosti 800, u kterých stačil čas broušení okolo 20 vteřin. Po broušení se vzorek pečlivě očistil vodou, odmastil se čistícím roztokem a případně vysušil horkovzdušným fénem. Osušení se provádí proto, aby se zabránilo případné korozi na povrchu vzorku. Po vysušení byl vzorek připraven na měření tvrdosti. Brousícím strojem byla bruska Phoenix 4000 (Obr. 3.10).



Obr. 3.10 Brousící stroj Phoenix 4000 [Vlastní]



Obr. 3.11 Brusné papíry [Vlastní]

3.1.7 Měření tvrdosti vzorků

Než by se začalo s měřením tvrdosti, tak by bylo vhodné nechat zalisované vzorky vytemperovat. Temperování se provádí proto, aby vzorek nebyl během měření ovlivněn okolní teplotou, což by mělo za následek nepřesné výsledky. Přesto v tomto případě okolní teplota na měření tvrdosti nehraje významnou roli a pro tento experiment se na ni moc nepřihlíželo. I přesto se vzorky nechaly v kontaktu s teplotou pracovního prostředí až po dobu jednoho týdne, než se začalo s měřením tvrdosti.

Pro měření tvrdosti byl použit tvrdoměr Qness Q30A (*Obr. 3.12*) dle metody Vickerse. Každý testovaný vzorek se podrobil zatížení 0,1; 0,5; 1; 5; 10; 30 kg a sledovala se závislost zatížení vůči tvrdosti. Všechny vzorky podstoupily alespoň 10 měření od každého zatížení, protože více naměřených hodnot zajistí přesnější výsledky. Všechny naměřené hodnoty a závislosti jsou v následujících tabulkách a grafech, kde je vidět i jejich srovnání (*Tab. 3.5 až Tab. 3.11*).

Celé měření tvrdosti pracuje na principu stupních šedi, tzn. že po zatížení se vpich jeví jako šedivý a okolní povrch je lesklý po broušení (bílý) (*Obr. 3.13*).

Na tomto principu tvrdoměr stanoví uhlopříčky vpichu a dokáže zjistit tvrdost zkoumaného materiálu. Při samotném měření je vhodné se nijak nedotýkat tvrdoměru ani pracovního stolu, aby nedošlo k ovlivnění měření.

U všech vpichů je lepší provést ruční kontrolu uhlopříček a případně změnit jejich velikost, to se provede na PC, který s tvrdoměrem komunikuje. Na PC se nastavují veškeré parametry související s měřením tvrdosti, od pojmenování vzorku, zatížení, počtu vpichů až po najíždění nad zkoumaný materiál. Celá zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN ISO 6507-1 (420374) dodána katedrou.

Jelikož při větších zatíženích (HV10, HV30) vzniklé vpichy vykazovaly velkou část plochy a bylo zapotřebí větších roztečí mezi nimi, tak se měření tvrdosti provádělo ve středu vzorku vždy za sebou, aby vpichy nebyly příliš blízko u okraje vzorku. Měření tvrdosti u okraje vzorku by mohlo mít nežádoucí vliv na výslednou tvrdost. Volená poloha místa měření tvrdosti i vzdálenost jednotlivých měření byla volena v souladu s normou ČSN EN ISO 6507-1 (420374).

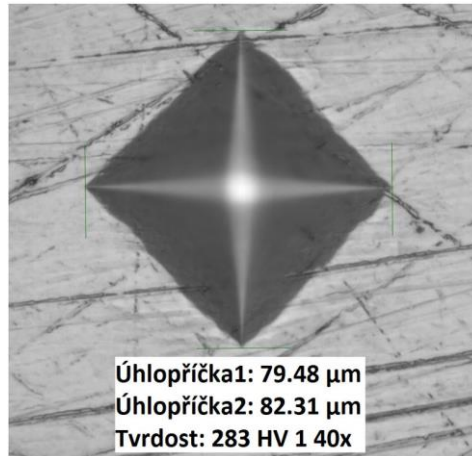


Obr. 3.12 Tvrdoměr Qness Q30A dle metody Vickerse [Vlastní]

V mnoha případech se objevují odlišná značení zatížení a různé jednotky zátěžné síly, proto je pro lepší přehlednost vložena převodní tabulka zatížení (*Tab. 3.3*).

Tab. 3.3 Převodní tabulka zatížení [Vlastní]

Převodní tabulka zatížení		
Označení tvrdosti	Zatížení [kg]	Zátěžná síla F [N]
HV0,1	0,1	0,981
HV0,5	0,5	4,905
HV1	1	9,81
HV5	5	49,05
HV10	10	98,1
HV30	30	294,3

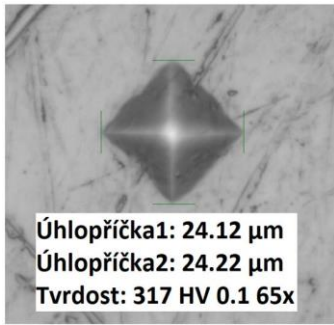
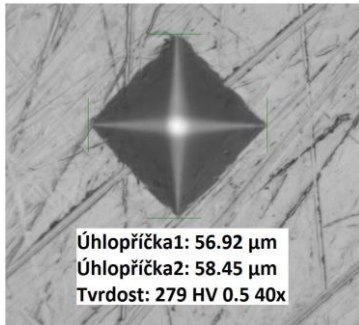
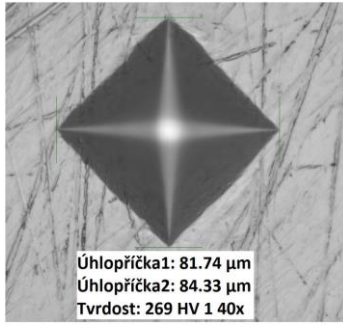
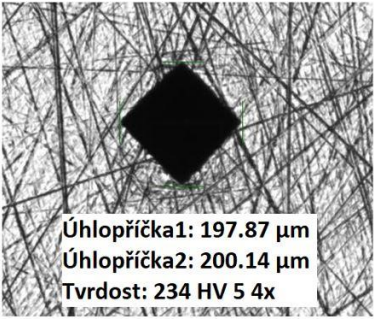
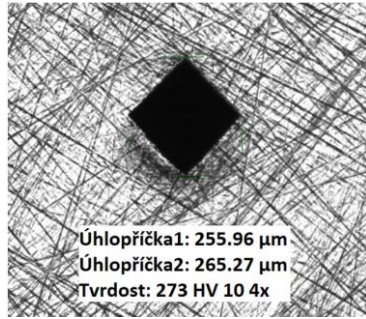
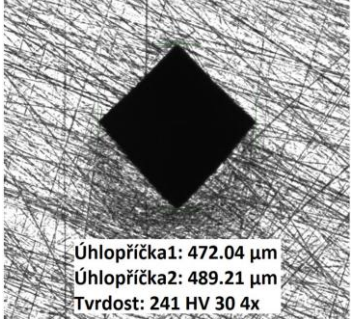


Obr. 3.13 Vpich po zatížení HV1 [Vlastní]

Na (Obr. 3.13) je vidět 40x zvětšený vpich do vícefázové TRIP ocele po zatížení HV1, zde naměřená tvrdost činí 283 HV a uhlopříčky vpichu jsou 79,48 µm a 82,31 µm.

V následující tabulce (Tab. 3.4) je znázorněno porovnání jednotlivých vpichů dle zatížení. Čím větší zatížení, tím tmavší a rozměrově větší vpich.

Tab. 3.4 Tabulka srovnání jednotlivých vpichů [Vlastní]

HV0,1	HV0,5	HV1
 <p>Úhlopříčka1: 24.12 µm Úhlopříčka2: 24.22 µm Tvrdost: 317 HV 0.1 65x</p>	 <p>Úhlopříčka1: 56.92 µm Úhlopříčka2: 58.45 µm Tvrdost: 279 HV 0.5 40x</p>	 <p>Úhlopříčka1: 81.74 µm Úhlopříčka2: 84.33 µm Tvrdost: 269 HV 1 40x</p>
HV5	HV10	HV30
 <p>Úhlopříčka1: 197.87 µm Úhlopříčka2: 200.14 µm Tvrdost: 234 HV 5 4x</p>	 <p>Úhlopříčka1: 255.96 µm Úhlopříčka2: 265.27 µm Tvrdost: 273 HV 10 4x</p>	 <p>Úhlopříčka1: 472.04 µm Úhlopříčka2: 489.21 µm Tvrdost: 241 HV 30 4x</p>

Výsledné naměřené hodnoty tvrdosti jsou vidět v *Tab. 3.5 až Tab. 3.11.*

Tab. 3.5 *Tabulka naměřených hodnot ve směru válcování – 0° bez deformace [Vlastní]*

0°	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	327	289	267	251	278	242
2	320	285	269	244	275	245
3	325	282	265	238	278	239
4	325	285	272	238	273	246
5	321	281	267	237	277	241
6	317	276	269	230	277	239
7	319	279	265	230	281	237
8	321	271	269	234	273	241
9	324	275	270	231	275	235
10	310	270	264	224	269	234
Průměrná hodnota [HV]	320,9 ± 4,679	279,3 ± 5,951	267,7 ± 2,41	235,7 ± 7,363	275,6 ± 3,2	239,9 ± 3,727

Tab. 3.6 *Tabulka naměřených hodnot ve směru válcování s 16,5% deformací [Vlastní]*

0° - 16,5%	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	349	320	308	311	304	303
2	342	313	314	301	307	303
3	340	320	305	306	308	304
4	335	312	311	299	309	302
5	350	317	312	295	308	299
6	331	314	320	302	303	302
7	347	321	320	302	303	300
8	349	316	317	298	300	302
9	341	325	316	297	301	302
10	355	323	322	293	299	302
Průměrná hodnota [HV]	343,9 ± 7,035	318,1 ± 4,158	314,5 ± 5,258	300,4 ± 5,024	304,2 ± 3,429	301,9 ± 1,375

Tab. 3.7 *Tabulka naměřených hodnot ve směru válcování s 21% deformací [Vlastní]*

0° - 21%	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	333	318	311	309	300	302
2	317	321	314	304	303	305
3	336	320	310	298	299	311
4	335	320	311	306	306	308
5	342	320	312	311	301	313
6	334	322	310	304	306	308
7	351	319	317	308	303	308
8	340	316	320	311	305	308
9	349	319	316	310	310	308
10	340	325	316	307	308	308
Průměrná hodnota [HV]	337,7 ± 8,989	320 ± 2,28	313,7 ± 3,257	306,8 ± 3,816	304,1 ± 3,36	307,9 ± 2,809

Tab. 3.8 Tabulka naměřených hodnot kolmo na válcování – 90° bez deformace [Vlastní]

90°	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	305	291	279	262	232	219
2	311	284	277	261	232	221
3	323	292	278	258	233	218
4	314	278	278	261	239	218
5	313	294	277	275	239	219
6	301	284	278	264	241	217
7	320	285	282	253	237	219
8	309	279	283	268	235	216
9	297	279	277	278	234	218
10	310	292	279	264	233	218
Průměrná hodnota [HV]	310,3 ± 7,55	285,8 ± 5,758	278,8 ± 1,99	264,4 ± 7,144	235,5 ± 3,106	218,3 ± 1,269

Tab. 3.9 Tabulka naměřených hodnot kolmo na válcování při 16% deformaci [Vlastní]

90° - 16%	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	334	308	304	296	318	292
2	323	316	303	294	295	296
3	330	318	309	297	300	301
4	346	306	296	296	299	298
5	339	323	301	300	301	303
6	327	316	299	289	305	297
7	328	305	307	295	301	298
8	325	313	306	295	305	298
9	334	314	300	295	303	298
10	320	322	307	295	303	298
Průměrná hodnota [HV]	330,6 ± 7,432	314,1 ± 5,924	303,2 ± 3,945	295,2 ± 2,6	303 ± 5,745	297,9 ± 2,737

Tab. 3.10 Tabulka naměřených hodnot kolmo na válcování při 22% deformaci [Vlastní]

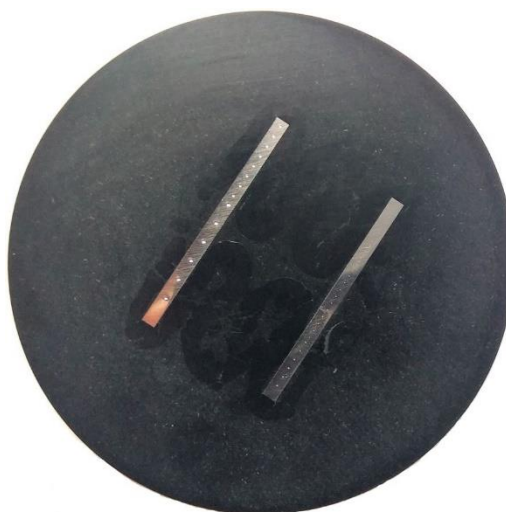
90° - 22%	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	372	310	307	311	302	299
2	354	309	313	306	300	302
3	359	324	309	311	304	304
4	362	319	308	311	300	305
5	376	317	317	309	304	303
6	343	322	313	310	303	303
7	404	317	311	298	290	303
8	350	319	318	300	301	303
9	344	312	309	298	302	303
10	363	322	310	303	299	303
Průměrná hodnota [HV]	362,7 ± 17,199	317,1 ± 4,949	311,5 ± 3,528	305,7 ± 5,216	300,5 ± 3,854	302,8 ± 1,47

Tab. 3.11 Tabulka naměřených hodnot – měřeno na plocho [Vlastní]

Na plocho	Zatížení					
Číslo měření	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30
1	316	253	250	281	290	286
2	332	242	239	278	268	292
3	328	242	234	249	240	238
4	331	243	236	236	223	237
5	332	239	236	237	228	230
6	327	249	233	232	231	227
7	319	239	228	229	232	229
8	329	244	233	229	227	226
9	310	251	231	230	228	229
10	301	249	242	237	223	224
Průměrná hodnota [HV]	322,5 ± 10,092	245,1 ± 4,763	236,2 ± 5,93	243,8 ± 18,713	239 ± 21,105	241,8 ± 24

Na základě vypočtených průměrných hodnot byla sestrojena nejistota měření typu A, která je určena základním souborem (měřené hodnoty) a směrodatnou odchylkou. Pro tuto nejistotu je důležité provést opakované měření, které se pro každé zatížení provedlo desetkrát. Směrodatná odchylka byla vypočtena pomocí funkce v Microsoft Excelu.

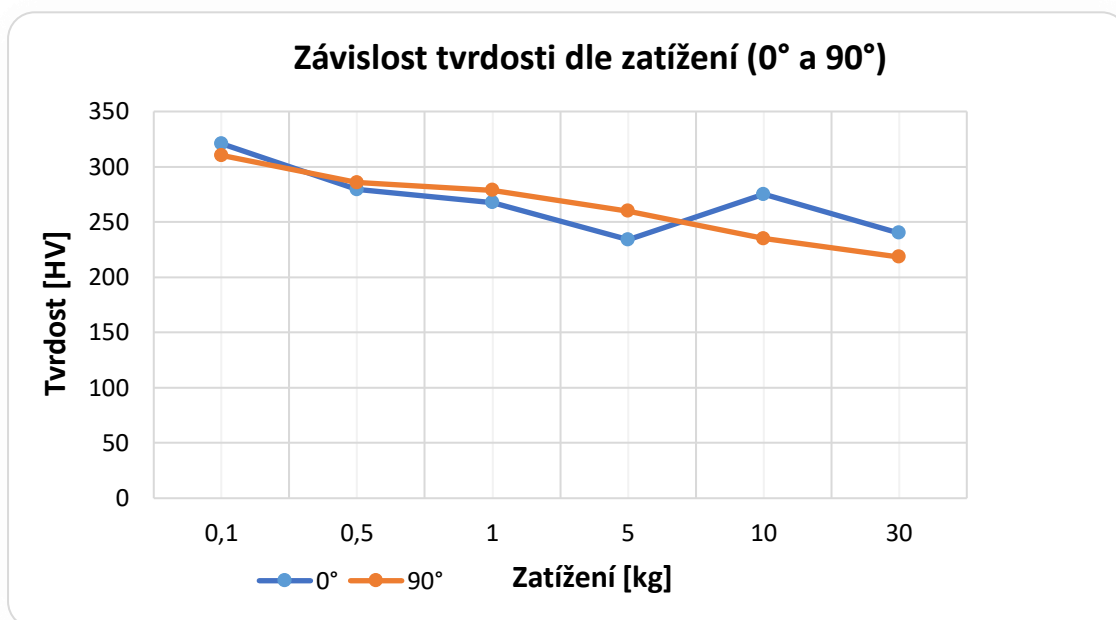
Na (Obr. 3.14) je znázorněn nalisovaný vzorek TRIP ocele, na kterém bylo provedeno měření tvrdosti. Stopy po měření jsou vyobrazeny drobnými vpichy uprostřed vzorku.



Obr. 3.14 Změřený vzorek TRIP ocele [Vlastní]

Z naměřených hodnot bylo možné sestavit grafy a jednotlivé vzorky mezi sebou porovnat. Jelikož pro oba typy vzorků (0° a 90°) vyšly ze statické zkoušky tahem přibližně stejné deformace, tak porovnání jejich výsledných hodnot je o to zajímavější.

3.1.8 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° bez deformace



Obr. 3.15 Graf závislosti dle zatížení pro vzorky 0° a 90° bez deformace [Vlastní]

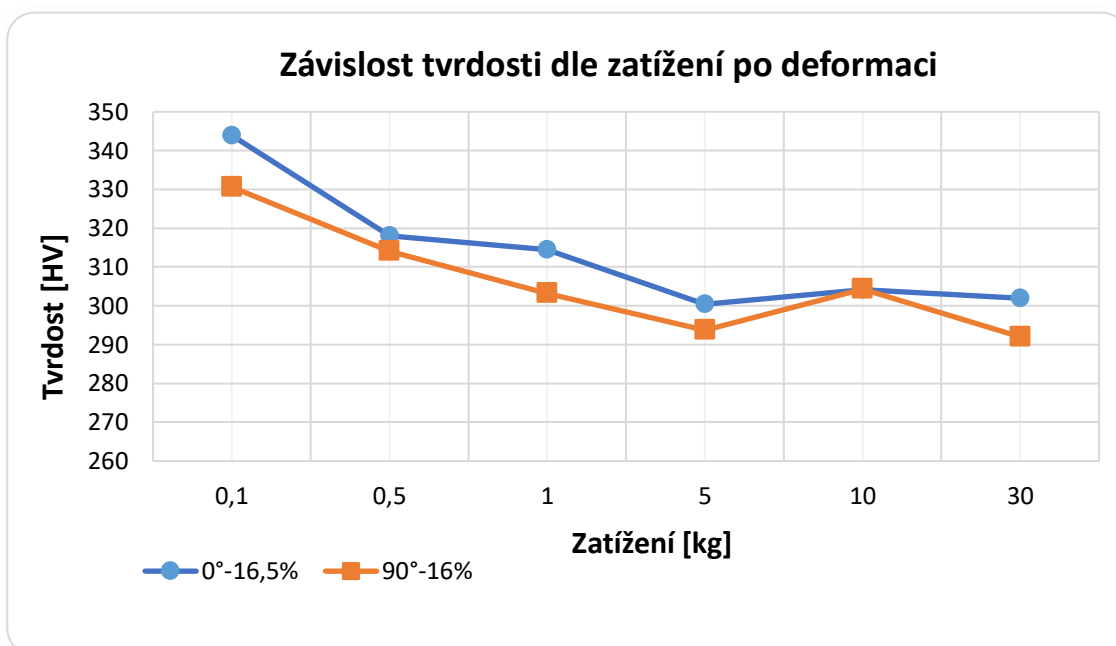
Z prvního grafu (Obr. 3.15) vyplývá, že výsledky tvrdosti pro vzorky s vlákny 0° a 90° bez provedené deformace se jeví téměř shodně, ačkoliv tvrdost pro vzorek s 0° vyšla průměrně o 2 % vyšší. Lze tedy konstatovat, že směr válcování má určitý, přesto minimální vliv na tvrdost. Tento výsledek se ověřil i za pomoci statistického testu, který je zobrazen v příloze (Příloha E).

Tvrdost pro oba vzorky při zatížení HV0,1 se pohybovala přes 310 HV, s rostoucím zatížením až do HV30 klesala na hodnotu okolo 230 HV, což představuje 25 % pokles tvrdosti.

Větší nárůst tvrdosti zaznamenal vzorek s 0° při zatížení HV10. Zde se tvrdost oproti vzorku s 90° vychýlila na hodnotu 275 HV, což znázorňovalo rapidní nárůst o 13 % oproti předchozímu zatížení.

Celkový průběh tvrdosti se pohyboval od 320 HV do 220 HV, to odpovídá mezi pevnosti v tahu od 1030–705 MPa. Veškeré naměřené hodnoty pro oba vzorky jsou uvedeny v Tab. 3.5 a Tab. 3.8.

3.1.9 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° s 16% deformací



Obr. 3.16 Graf závislosti tvrdosti dle zatížení pro vzorky 0° a 90° po 16% deformaci [Vlastní]

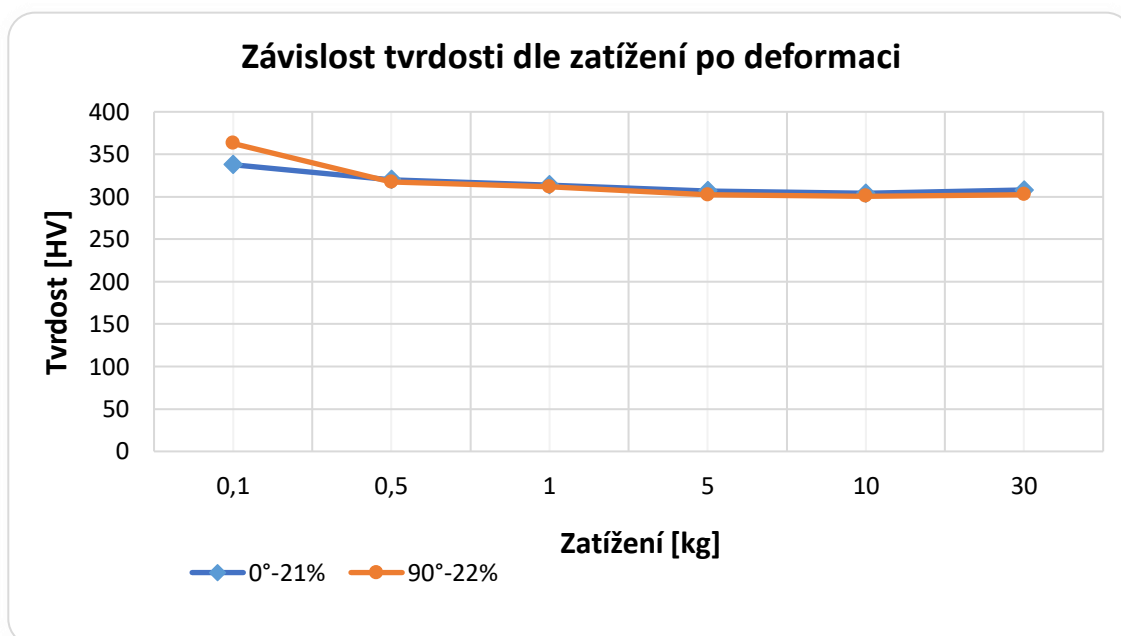
Z druhého grafu (Obr. 3.16) je vidět, že při téměř stejné deformaci (zhruba 16 %) se z pohledu tvrdosti jeví lépe vzorek s 0°, ačkoliv to může být způsobeno větší provedenou deformací o 0,5 %.

Průběh grafu se oproti grafu bez deformace moc nelišil a také s rostoucím zatížením měl klesající trend. Tvrdost od prvotního až po konečné zatížení klesla o 12 %.

Pro oba vzorky se celkový průběh tvrdosti pohyboval od zhruba 340 HV do 300 HV, takže na mezi pevnosti v tahu od 1098–965 MPa. Naměřené hodnoty jsou zaznamenány v Tab. 3.6 a Tab. 3.9.

Oproti nedeformovatelným vzorkům z prvního grafu tvrdost prudce narostla až o 16 %. Z toho vyplývá, že rostoucí deformace má vliv na finální tvrdost.

3.1.10 Srovnávací graf – vzorky 0° a 90° s 21% deformací



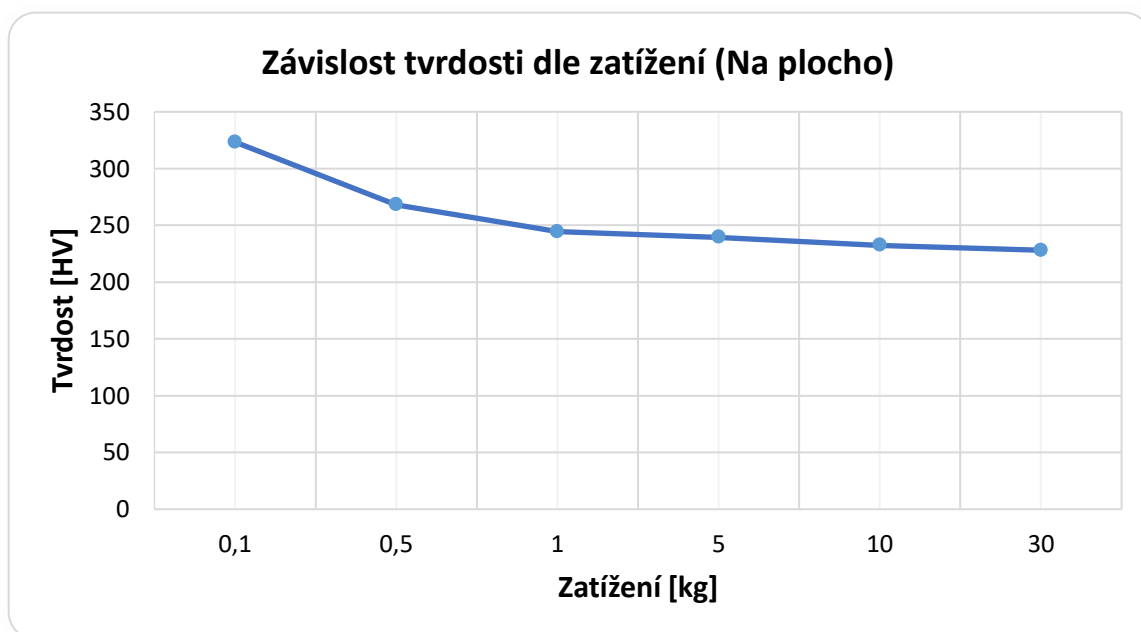
Obr. 3.17 Graf závislosti tvrdosti dle zatížení pro vzorky 0° a 90° po 21% deformaci [Vlastní]

Ve třetím grafu (Obr. 3.17) je znázorněno, že pro oba typy vzorků s více jak 20% deformací je závislost tvrdosti dle zatížení téměř shodná a ustálená na hodnotě 300 HV, což představuje hodnotu 965 MPa na mezi pevnosti v tahu. Tato tvrdost, respektive pevnost se pohybovala již od zatížení HV5 až do zatížení HV30. Naměřené hodnoty jsou znázorněny v Tab. 3.7 a Tab. 3.10.

Lze konstatovat, že při vyšší provedené deformaci by tvrdost s rostoucím zatížením ještě více narůstala a ustálila se již při menších zatíženích, avšak tyto deformace představují maximální možnou hodnotu provedeného zatížení a při vyšších deformacích by vzorek prasknul.

Ze všech grafů se dá všimnout, že jakákoli větší provedená deformace představuje vyšší hodnoty tvrdosti. Pokud by pro oba vzorky byla vždy provedená úplně stejná deformace, tak vždy by vzorek s 0° vykazoval vyšší hodnoty tvrdosti, než vzorek s 90°, jelikož směr válcování má určitý vliv na tvrdost, jak se ověřilo v prvním grafu. Směr válcování vůči tvrdost má však naprosto minimální vliv oproti provedeným deformacím.

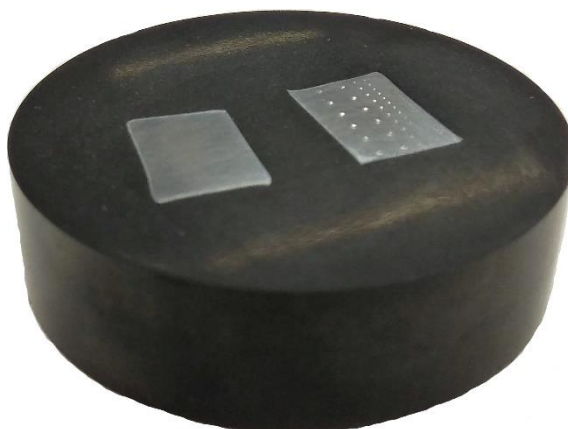
3.1.11 Graf – vzorek na plocho



Obr. 3.18 Graf závislosti tvrdosti dle zatížení pro vzorek měřený na plocho [Vlastní]

Z grafu pro měření vzorku na plocho (Obr. 3.18) tvrdost klesala s rostoucím zatížením od 320 HV do 240 HV, což odpovídá poklesu tvrdosti o 25 %. Jelikož vzorek nebyl nijak deformovatelný, tak naměřené hodnoty se téměř shodují se vzorky z prvního grafu.

Při měření tohoto vzorku bylo důležité pamatovat na provedení ohyb pro nalisování. U ohybu je totiž větší deformace, která by mohla ovlivnit měření tvrdosti. Pro lepší představu je graf doplněn obrázkem po měření (Obr. 3.19).



Obr. 3.19 Změřený vzorek na plocho [Vlastní]

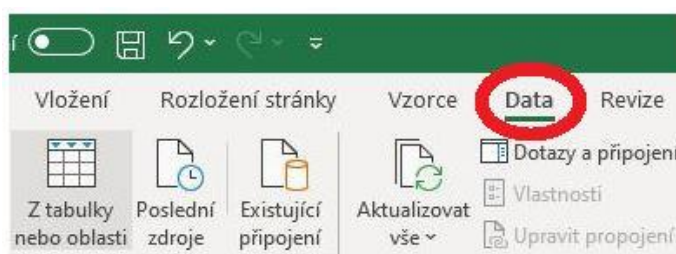
3.2 Statistické vyhodnocení naměřených dat

Ze všech grafů je patrné, že u měřených vzorků má zatížení vliv na výslednou tvrdost. Pro ověření těchto výsledků je zapotřebí provést Analýzu dat v Microsoft Excelu za pomoci Analytických nástrojů, tímto způsobem se ověří, zda velikost zatížení má skutečně vliv na výsledek zkoušky dle Vickerse.

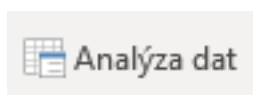
Dalším krokem k ověření naměřených dat je třeba si předepsat statistickou hypotézu. Statistickou hypotézu lze rozdělit na nulovou (testovanou) hypotézu H_0 a alternativní hypotézu H_1 . Pokud dojde k odmítnutí nulové hypotézy, tak nastane alternativní hypotéza. U nulové hypotézy dochází k tomu, že vliv faktoru lze nazvat jako statisticky nevýznamný, opakem je alternativní hypotéza, u které je vliv faktoru statisticky významný. Pokud se chce zjistit o jakou hypotézu se jedná, je třeba za pomoci F-testu vypočítat testovací kritérium F . Toto testovací kritérium se porovnává s kritickou hodnotou F_{krit} , která se vybere ze statistických tabulek dle zvolené hladiny významnosti α (nejčastěji 5 %). Pokud je splněna podmínka $F_{krit} < F$, tak dochází k odmítnutí nulové hypotézy a nastává alternativní hypotéza, tzn. že vliv faktoru je statisticky významný. [26]

3.2.1 Postup ověření a vyhodnocení výsledků

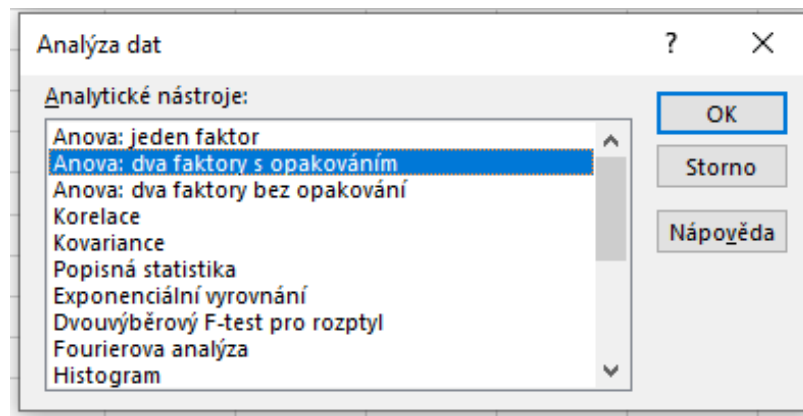
Po otevření Microsoft Excelu se přejde do záložky *Data* (Obr. 3.20) vyskytující se v horní nabídce. Po rozkliknutí této záložky se objeví ikona *Analýza dat* (Obr. 3.21), která po jejím otevření nabídne panel Analytických nástrojů (Obr. 3.22).



Obr. 3.20 Záložka Data [Vlastní]



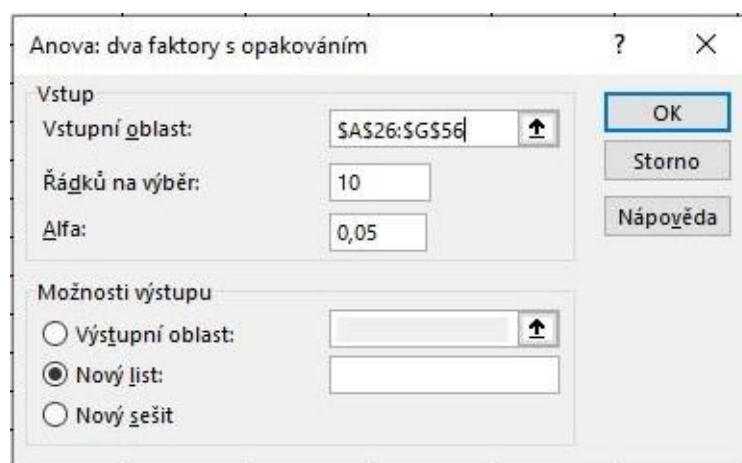
Obr. 3.21 Ikona Analýza dat [Vlastní]



Obr. 3.22 Panel Analytických nástrojů [Vlastní]

Jelikož se celé měření zabývá na závislosti dvou veličin (zatížení a tvrdost), tak se bude jednat o situaci dvou faktorů. Také záleží na tom, že v každém sloupci z provedeného zatížení je více naměřených hodnot tvrdosti, proto se jedná o opakování. Z toho vyplývá, že v Analytických nástrojích se zvolí na výběr *Anova: dva faktory s opakováním*. Poté se vybere vstupní oblast, kterou je zapotřebí prověřit a vloží se počet řádků zkoumaných hodnot (Obr. 3.23). V tomto případě je zvoleno 10 řádků, protože na každé zatížení se provedlo 10 měření. Hladina testu označována jako α je ponechána na hodnotě 5 %, z toho plyne, že výsledek měření s 95% pravděpodobností se oprávněně nachází uvnitř intervalu, který je definován jako nejistota měření.

Anova je také pojmenována jako analýza rozptylu, která dokáže ověřit, jestli na jednu libovolnou veličinu má statisticky významný vliv druhá hodnota, která se u libovolné veličiny dá sledovat. [27]



Obr. 3.23 Dva faktory s opakováním [Vlastní]

Po stisknutí tlačítka *OK* se zobrazí vyhodnocení, podle kterého se definuje, zda zatížení má vliv na tvrdost. Vyhodnocení se zjistí tak, že v řádku *Výběr* musí být hodnota $F_{krit} < F$, pokud je tato podmínka splněna, lze říct, že velikost zatížení má vliv na výsledek zkoušky dle Vickerse.

Statistické vyhodnocení v přílohách (*Příloha C*, *Příloha D*) potvrzuje, že výsledky ověřené pomocí Analytických nástrojů dokazují pravdu o tom, že zatížení má opravdu vliv na tvrdost vícefázové TRIP ocele. Tímto se úspěšně dosáhlo toho, co bylo hlavním cílem této bakalářské práce.

4 Závěr

Cílem práce bylo zjistit, zda změna velikosti zatížení má vliv na tvrdost vícefázové TRIP ocele. Z naměřených hodnot lze stanovit, že s rostoucí deformací se navyšuje hodnota tvrdosti materiálu. Toto tvrzení lze vidět ze všech srovnávacích grafů a naměřených hodnot, kdy nedeformovatelné vzorky vykazují menší tvrdost oproti deformovatelným vzorkům.

Aby se docílilo správného cíle, bylo zapotřebí dodržet i postup práce. Tzn. nařezat a správně nalisovat vzorky, upravit broušením jejich povrch a provést měření tvrdosti na tvrdoměru. Jednotlivé úkony jsou detailněji popsány v praktické části.

Výsledný vliv zatížení vůči tvrdosti byl ověřen za pomoci Analytických nástrojů v Microsoft Excelu, ve kterém se potvrdilo, že velikost zatížení má skutečně vliv na tvrdost zkoumané vícefázové TRIP ocele. Tímto lze říct, že vícefázová TRIP ocel se používá na správném místě a tím je automobilový průmysl a jeho bezpečnostní prvky.

Za pomoci statistického testu se ověřilo, že i směr válcování má určitý, přesto minimální vliv na tvrdost. Pro vzorek ve směru válcování (0°) vyšla průměrná tvrdost o 2 % vyšší, než u vzorku kolmo na válcování (90°).

S větší provedenou deformací narůstala hodnota tvrdosti. Vzorky s 21% deformací vykazovaly oproti nedeformovatelným vzorkům nárůst tvrdosti až o 16 %.

Menší zdržení se projevilo při lisování prvotních vzorků, kde již zalisované vzorky nebyly kolmo k povrchu, proto se musely stanovit menší úpravy v jejich uchycení.

Při měření tvrdosti mohu doporučit ničím neovlivňovat samotné měření, například řádně upnout nalisovaný vzorek, nedotýkat se tvrdoměru při měření a neopírat se o stůl.

Bakalářskou práci lze považovat za úspěšnou a dokončenou.

Seznam použité literatury

- [1] *Zkoušky tvrdosti*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.opi.zcu.cz/Zkousky_tvrlosti.pdf.
- [2] *Měření tvrdosti*. [Online] 8. Květen 2022. <http://www.merenitvrlosti.cz/tvrlost.html>.
- [3] *Statické zkoušky tvrdosti*. [Online] 8. Květen 2022. <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1105>.
- [4] *Zkouška tvrdosti podle Brinella*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-brinella/>.
- [5] *Zkouška tvrdosti podle Brinella*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/KOM_3_11_SPU-mereni_tvrlosti_2.pdf.
- [6] *Zkouška tvrdosti podle Brinella*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.hardnesstesters.com/test-types/brinell-hardness-testing>.
- [7] *Zkouška tvrdosti podle Rockwella*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.hardnesstesters.com/test-types/rockwell-hardness-testing>.
- [8] *Zkouška tvrdosti podle Rockwella*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-rockwella/>.
- [9] *Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. [Online] 8. Květen 2022. <https://matmatch.com/learn/property/vickers-hardness-test>.
- [10] *Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.hanyko-praha.cz/produkty/tvrdomery/co-je-tvrlost-a-jak-se-meri/zkouska-tvrlosti-podle-vickerse/>.
- [11] *TRIP ocele*. [Online] 8. Květen 2022. https://automotive.arcelormittal.com/products/flat/first_gen_AHSS/TRIP.
- [12] *Metalurgie TRIP ocele*. [Online] 8. Květen 2022. <https://ahssinsights.org/metallurgy/steel-grades/3rdgen-ahss/transformation-induced-plasticity-trip/>.
- [13] *Struktura TRIP ocele*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.google.com/search?q=trip+steel&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiztOzHy8H3AhULMewKHTvLCzgQ_AUoAXoECAIQAw&biw=1536&bih=750&dpr=1.25.
- [14] *Ocele pro automobilové karoserie*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.mmspektrum.com/clanek/svaritelnost-oceli-pro-automobilove-karoserie>.
- [15] *Struktura DP ocele*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.google.com/search?q=dp+oceli+struktura&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwj48pyD0YL3AhVxRvEDHRcmDIUQ_AUoAXoECAEQAw&biw=1536&bih=750&dpr=1.2.
- [16] *Vícefázová CP ocel*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.nationalmaterial.com/complex-phase-steel/>.
- [17] *Struktura CP ocele*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.google.com/search?q=cp+oceli+struktura&hl=cs&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwikobb3joT3AhUXhP0HHSJCSgQ_AUoAXoECAEQAw&cshid=1649409106923462&biw=1536&bih=750&dpr=1.25#imgsrc=G3UFC1POpr7qDM.

- [18] *MS ocele*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.ssab.com/brands-and-products/docol/automotive-steel-grades/martensitic-steel>.
- [19] *Struktura MS ocele*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.google.com/search?q=MS+oceli+struktura&hl=cs&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwiXkqCokIT3AhXkhv0HHQm3ARMQ_AUoAXoECAEQAw&cshid=1649409429418720&biw=1536&bih=750&dpr=1.25#imgrc=-OUpANdfLVcq7M.
- [20] *Vysokopevnostní nízkolegované HSLA ocele*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/high-strength-low-alloy-steel>.
- [21] *Vlastnosti ocelí pro stavbu karoserií*. [Online] 8. Květen 2022. https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2296/bc_12373.pdf?sequence=1.
- [22] *Vlastnosti ocelí v automobilovém průmyslu*. [Online] 8. Květen 2022. https://www.vut.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=40077.
- [23] Doubek, Pavel. *RA-K 40/70*. [Online] 17. Květen 2022. https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/38810/U_478_S.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [24] *Statická zkouška tahem*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.mtu.edu/materials/k12/experiments/tensile/>.
- [25] *Statická zkouška tahem*. [Online] 8. Květen 2022. <https://www.admet.com/testing-applications/test-types/tension-testing/>.
- [26] *ANOVA statistika a výpočetní technika*. [Online] 18. Květen 2022. <https://cit.vfu.cz/statpotr/POTR/Teorie/Predn3/ANOVA.htm>.
- [27] *Anova statistika*. [Online] 18. Květen 2022. https://cs.wikipedia.org/wiki/Anal%C3%BDza_rozptylu..

Seznam příloh

- Příloha A: Protokol ze statické zkoušky tahem pro vzorek ve směru válcování
- Příloha B: Protokol ze statické zkoušky tahem pro vzorek kolmo na válcování
- Příloha C: Statistické vyhodnocení výsledků – vzorky 0°
- Příloha D: Statistické vyhodnocení výsledků – vzorky 90°
- Příloha E: Statistické vyhodnocení výsledků – vzorek 0° a 90° bez deformace

Přílohy A

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

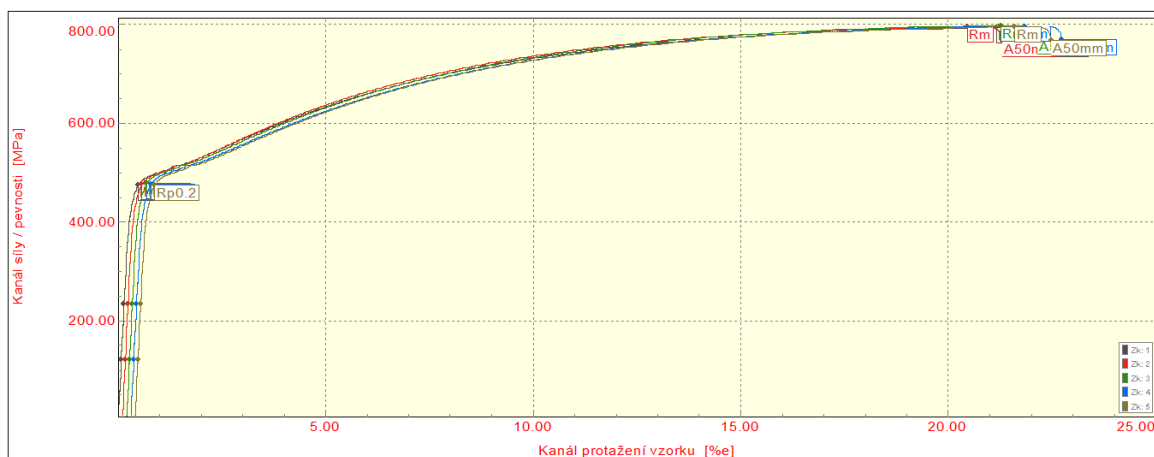
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : RA-K 42/70
Rozměry vzorku : [1,5 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 0°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
Vypracoval : Oldřich Pačesný
Datum provedení testu : 8.10.2021
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	474.87	793.98	20.69	21.59
2	476.54	795.14	19.90	20.77
3	477.46	798.28	20.60	21.49
4	476.19	797.10	21.06	21.98
5	475.71	795.54	20.73	21.63

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	476.15	796.01	20.60	21.49
Směrodatná odchylka	0.96	1.69	0.43	0.44
Minimální hodnota	474.87	793.98	19.90	20.77
Maximální hodnota	477.46	798.28	21.06	21.98



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

Příloha B

STATICKÁ ZKOUŠKA TAHEM

EN ISO 6892-1

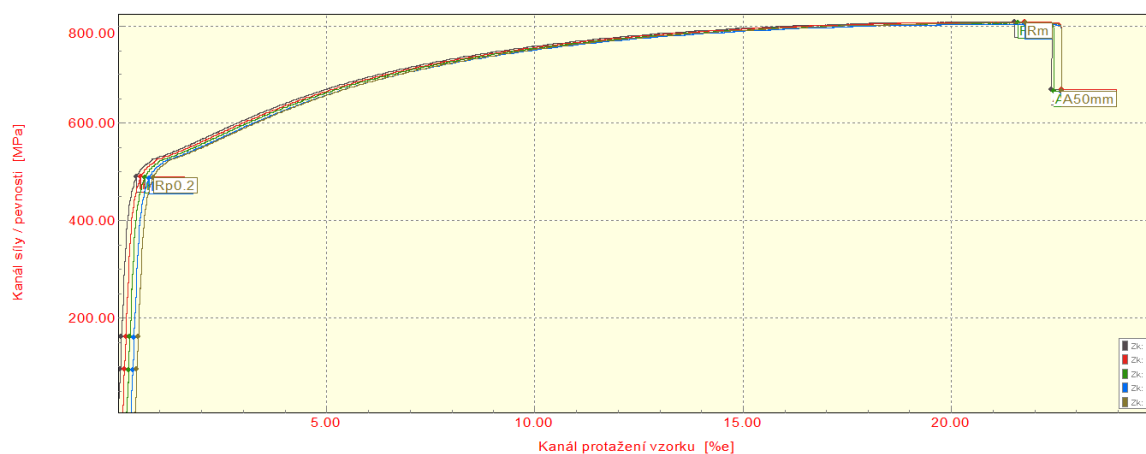
VSTUPNÍ PARAMETRY

Název materiálu : RA-K 42/70
Rozměry vzorku : [1,5 x 20] mm
Směr odebrání vzorku : 90°
Teplota : RT
Rychlost posuvu : 1 [15] mm/min.
Vypracoval : Oldřich Pačesný
Datum provedení testu : 8.10.2021
Pozn. :

VÝSTUPNÍ HODNOTY

Zkouška	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
1	489.87	808.99	21.14	22.09
2	489.28	808.18	21.28	22.23
3	488.20	805.75	21.01	21.95
4	487.07	804.14	21.09	22.03
5	488.58	806.15	21.00	21.94

Statistika	Rp0.2 MPa	Rm MPa	Ag %	A50mm %
Počet zkoušek	5	5	5	5
Průměrná hodnota	488.60	806.64	21.10	22.05
Směrodatná odchylka	1.07	1.95	0.11	0.12
Minimální hodnota	487.07	804.14	21.00	21.94
Maximální hodnota	489.87	808.99	21.28	22.23



TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
Katedra strojírenské technologie
Oddělení tváření kovů a plastů
Studentská 2, 461 17, Liberec 1, CZ

Příloha C

Anova: dva faktory s opakováním							
Faktor	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30	Celkem
<i>0°</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3209	2793	2677	2357	2756	2399	16191
Průměr	320,9	279,3	267,7	235,7	275,6	239,9	269,85
Rozptyl	24,32222	39,34444	6,455556	60,23333	11,37778	15,43333	836,9093
<i>0°-16,5%</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3439	3181	3145	3004	3042	3019	18830
Průměr	343,9	318,1	314,5	300,4	304,2	301,9	313,8333
Rozptyl	54,98889	19,21111	30,72222	28,04444	13,06667	2,1	249,4294
<i>0°-21%</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3377	3200	3137	3068	3041	3079	18902
Průměr	337,7	320	313,7	306,8	304,1	307,9	315,0333
Rozptyl	89,78889	5,777778	11,78889	16,17778	12,54444	8,766667	154,0328
<i>Celkem</i>							
Počet	30	30	30	30	30	30	
Součet	10025	9174	8959	8429	8839	8497	
Průměr	334,1667	305,8	298,6333	280,9667	294,6333	283,2333	
Rozptyl	150,1437	383,8207	510,2402	1099,344	198,8609	985,6333	
ANOVA							
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>	
Výběr	79550,14	2	39775,07	1590,492	3,3E-107	3,051819	
Sloupce	56218,83	5	11243,77	449,6063	5,38E-93	2,26996	
Interakce	12911,79	10	1291,179	51,63058	2,91E-45	1,889561	
Dohromady	4051,3	162	25,00802				
Celkem	152732,1	179				F krit < F	

Příloha D

Anova: dva faktory s opakováním							
Faktor	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30	Celkem
<i>90°</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3103	2858	2788	2644	2355	2183	15931
Průměr	310,3	285,8	278,8	264,4	235,5	218,3	265,5167
Rozptyl	63,34444	36,84444	4,4	56,71111	10,72222	1,788889	996,8641
<i>90°-16%</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3306	3141	3032	2952	3030	2979	18440
Průměr	330,6	314,1	303,2	295,2	303	297,9	307,3333
Rozptyl	61,37778	38,98889	17,28889	7,511111	36,66667	8,322222	171,5819
<i>90°-22%</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3627	3171	3115	3057	3005	3028	19003
Průměr	362,7	317,1	311,5	305,7	300,5	302,8	316,7167
Rozptyl	328,6778	27,21111	13,83333	30,23333	16,5	2,4	524,8845
<i>Celkem</i>							
Počet	30	30	30	30	30	30	
Součet	10036	9170	8935	8653	8390	8190	
Průměr	334,5333	305,6667	297,8333	288,4333	279,6667	273	
Rozptyl	622,1195	237,6782	210,2816	347,0816	1029,885	1555,655	
ANOVA							
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>	
Výběr	89162,41	2	44581,21	1051,964	1,57E-93	3,051819	
Sloupce	72990,58	5	14598,12	344,4657	2,37E-84	2,26996	
Interakce	20050,52	10	2005,052	47,31239	5,51E-43	1,889561	
Dohromady	6865,4	162	42,37901				
Celkem	189068,9	179			F krit < F		

Příloha E

Anova: dva faktory s opakováním							
Faktor	HV0,1	HV0,5	HV1	HV5	HV10	HV30	Celkem
<i>SMĚR_0</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3209	2793	2677	2357	2756	2399	16191
Průměr	320,9	279,3	267,7	235,7	275,6	239,9	269,85
Rozptyl	24,32222	39,34444	6,455556	60,23333	11,377778	15,43333	836,9093
<i>SMĚR_90</i>							
Počet	10	10	10	10	10	10	60
Součet	3103	2858	2788	2644	2355	2183	15931
Průměr	310,3	285,8	278,8	264,4	235,5	218,3	265,5167
Rozptyl	63,34444	36,84444	4,4	56,71111	10,722222	1,788889	996,8641
<i>Celkem</i>							
Počet	20	20	20	20	20	20	
Součet	6312	5651	5465	5001	5111	4582	
Průměr	315,6	282,55	273,25	250,05	255,55	229,1	
Rozptyl	71,09474	47,20789	37,56579	272,1553	433,62895	130,9368	
ANOVA							
<i>Zdroj variability</i>	<i>SS</i>	<i>Rozdíl</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Hodnota P</i>	<i>F krit</i>	
Výběr	563,3333	1	563,3333	20,42433	1,594E-05	3,929012	
Sloupce	89896,77	5	17979,35	651,8632	6,318E-79	2,298431	
Interakce	15317,07	5	3063,413	111,0678	6,42E-41	2,298431	
Dohromady	2978,8	108	27,58148				
Celkem	108756	119				F krit < F	