

Přírodovědecká fakulta

KATEDRA
EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY
Univerzita Palackého v Olomouci

Diplomová práce

**Korelace vrubové houževnatosti a
mikrotvrdosti**

Autor:	Bc. Lenka Raszková
Vedoucí práce:	Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.
Studijní obor:	Nanotechnologie
Forma studia:	Prezenční
Rok:	2018

Jméno a příjmení autora: Lenka Raszková

Název práce: Korelace vrubové houževnatosti a mikrotvrdosti

Typ práce: Diplomová

Pracoviště: SLO – Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR
Enviform, a.s., Třinec, akreditované mechanické zkušebny

Vedoucí práce: Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.

Rok obhajoby práce: 2018

Počet stran: 58

Počet příloh: 0

Jazyk: Český

Abstrakt: Diplomová práce pojednává o mechanickém zkoušení oceli. Vzorky jsou ze třídy oceli 11, 12 a 15. Vzorky jsou zkoumány zkouškou rázem v ohybu metodou Charpy, tahovou zkouškou, je měřená nanoindentace a klasická zkouška tvrdosti – mikroindentace, na kterou byl použitý Vickersův a Brinellův indenter. Následně jsou data porovnávány a zobrazeny korelace mezi houževnatostí, tvrdostí, obsahem uhlíku, nárazovou prací, modulem pružnosti a dalšími charakteristikami materiálu.

Klíčová slova: Nanoindentace, zkouška rázem v ohybu metodou Charpy, zkouška tahem, zkouška tvrdosti, ocel.

Author's name: Lenka Raszková

Title: Assessment of notch toughness at macro and micro scale

Type of thesis: Diploma

Department: SLO – Joint Laboratory of Optics of Palacky University and Institute of Physics of the Czech Academy of Sciences
Enviform, a.s., Třinec, mechanical testing room

Supervisor: Mgr. Radim Čtvrtlík, Ph.D.

Year of presentation: 2018

Number of pages: 58

Number of appendices: 0

Language: Czech

Abstract: This diploma thesis is focused on mechanical testing of steel. Steel samples are from the group of steel grade 11, 12 and 15. The samples has been tested with these tests: Charpy impact test, the tensile test, nanoindentation and classic hardness test – microindentation, where is used Vicker's and Brinell's indenter. The correlations between toughness, hardness, volume of carbon, Charpy fracture energy, elastic modulus and others materials characteristics are studied.

Keywords: Nanoindentation, Charpy impact test, tensile test, hardness test, steel.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracovala samostatně pod vedením Mgr. Radima Čtvrtlíka, Ph.D., a že jsem použila zdrojů, které cituji a uvádím v seznamu použitých zdrojů.

V Olomouci dne

Podpis

Poděkování

Chtěla bych poděkovat svému vedoucímu Mgr. Radimu Čtvrtlíkovi, Ph.D., za odborné rady, velikou trpělivost, ochotu, věnovaný čas a pomoc při psaní diplomové práce. Dále bych ráda poděkovala firmě Enviform a.s, zejména Ing. Jindřichu Lasotovi, za umožnění spolupráce, poskytnutí vzorků, odborného poradenství a za čas, který mi věnovali.

Nakonec chci poděkovat své rodině za trpělivost a vytvoření podmínek k psaní diplomové práce.

Obsah

Úvod	8
1. TEORETICKÁ ČÁST	10
1.1. Ocel	10
1.1.1. Legování	10
1.1.2. Zkoušení	11
1.2. Dynamické zkoušky	12
1.2.1. Zkouška rázem v ohybu ^{[9],[10]}	12
1.3. Statické zkoušky	17
1.3.1. Tahová zkouška	17
1.4. Zkoušky tvrdosti – vtisková zkouška	20
1.4.1. Brinellova zkouška tvrdosti	22
1.4.2. Vickersova zkouška tvrdosti	22
1.4.3. Ostatní zkoušky tvrdosti	24
1.2. Metoda Olivera a Pharra	26
1.5. Tepelné zpracování kovu	28
1.5.1. Žihání bez překrystalizace	28
1.5.2. Žihání na odstranění pnutí	28
1.5.3. Rekrystalizační žihání	29
1.6. Chemickotepelné zpracování	29
1.6.1. Cementování	29
1.6.2. Nitridování	31
2. PRAKTICKÁ ČÁST	33
2.1. Popis experimentálního zařízení	33
2.1.1. NanoTest™ NTX	33
2.1.2. Mikroindentor	34
2.1.3. Charpyho kladívko	35

2.1.4.	Trhací stroj	36
2.2.	Popis vzorků	37
2.3.	Analýza získaných dat	41
2.3.1.	Zkoušky tvrdosti na mikroindentoru	41
2.3.2.	Zkoušky tvrdosti na nanoindentoru.....	42
2.3.3.	Zkoušky rázem v ohybu	43
2.3.4.	Zkouška tahem.....	45
2.3.5.	Studium vzájemných korelací	49
Závěr	.....	54
Seznam použité literatury		55
Seznam symbolů		58

Úvod

Ocel je materiál, který se používá mnoho let ke konstrukcím, v potravinářství, k výrobě šperků nebo zbraní. V poslední době se ale na ocel pohlíží jako na materiál, který nám může nabídnout více. Díky novým výrobním postupům umíme vyrobit ocel se stále větší tvrdostí nebo odolností. Nové oceli, které díky změně chemického složení mají v sobě menší množství uhlíku, jsou lépe obrobitelné a svařovatelné. Z ekonomických a praktických důvodů budou nahrazovat některé plastové součástky v technickém průmyslu. [1] Jedním z novodobých problémů ocelí je pevnost svarů při svařování. Nové studie zkoumají přidávání různých nanomateriálů do oceli, díky čemuž je svár pevnější a odolnější. [2] V neposlední řadě se ocel dostává do medicíny, kdy se využívají oceli k výrobě implantátů, které jsou vystaveny dynamickému i statickému namáhání. Zde je potřeba, aby ocel byla biokompatibilní, pevná, korozivzdorná, odolná proti únavě a měla vysoký modul pružnosti. [3]

Na světlo se dostává potřeba zkoumat materiály z nano a mikro-pohledu. Se zmenšujícími se rozměry je potřeba více eliminovat mřížkové defekty, které ovlivňují mechanické vlastnosti v daném bodě. Speciálně pro nanoindentaci jsou mřížkové defekty velice nebezpečnou záležitostí. S vzrůstajícími požadavky na mechanické vlastnosti materiálů a se stále se zmenšujícími rozměry je třeba se zamyslet, jak zvládneme udržet kvalitu oceli na požadované úrovni. Stále se přichází na nové postupy při výrobě oceli, které nám umožňují získat lepší mechanické vlastnosti materiálu. Ať už jde o větší korozivzdornost, pevnost, houževnatost, větší modul pružnosti, stabilnější povrchovou úpravu nebo lepší odolnost v tahu či tlaku, je třeba dané vlastnosti průběžně zkoušet a kontrolovat. Otázkou zůstává, zda mechanické zkoušky, které se u objemových materiálů používají již dlouhá léta, můžeme korelovat s těmi prováděnými i na nano/mikro úrovni. Miniaturizace s sebou přináší nové technologické přístupy a vyvstává potřeba testovat vzorky velmi malých objemů. Jedním z vhodných způsobů testování vzorků malých objemů je nanoindentace.

Diplomová práce pojednává o mechanických vlastnostech ocelí získaných z klasických mechanických zkoušek, které se používají dlouhodobě a z nanoindentace,

relativně nové metody. Práce se zaměřuje na korelaci klasických mechanických zkoušek, zejména vrubové houževnatosti, s nanoindentační zkouškou.

První část diplomové práce je teoretická. Věnuje se charakterizaci oceli z hlediska jejího složení a kategorizaci. Následuje popis dynamických zkoušek, kterými můžeme ocel zkoumat. Mezi popisované zkoušky patří zkouška rázem v ohybu, tahová zkouška, vnikací zkouška tvrdosti a nanoindentační zkouška. Následně jsou blíže popsány vnikací zkoušky – zkouška podle Vickerse a Brinella. Teoretickou část diplomové práce uzavírá popis tepelného a chemicko-tepelného zpracování kovu.

Data z praktické části diplomové práce byla měřena na dvou pracovištích. Prvním z nich je Společná laboratoř optiky Univerzity Palackého v Olomouci a Fyzikálního ústavu Akademie věd ČR. Druhým pracovištěm je firma Enviform, a.s., která má akreditované mechanické zkušebny v Třinci. Díky možnosti měřit mechanické vlastnosti ve firmě Enviform, a.s. byly použity vzorky ze širokého spektra oceli a měřilo se na přístrojích, které nejsou ve Společné laboratoři optiky Univerzity Palackého v Olomouci a Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR k dispozici.

V prvním úseku praktické části diplomové práce jsou popsána použitá experimentální zařízení, včetně jejich fotografií. Následuje podrobnější popis vzorků včetně převodní tabulky s označením, jaké se v práci používají. Z důvodu zachování výrobního know-how nebylo možné do diplomové práce uvést u žádného vzorku jeho tavbu, jelikož by šlo dohledat jeho přesný výrobní postup, proto se uvádí pracovní označení. Po popisu vzorků následuje analýza naměřených dat. V poslední části práce se nachází závěr, kde jsou výsledky okomentovány a je nastíněno další využití diplomové práce a případné další zkoumání vzorků.

1. TEORETICKÁ ČÁST

1.1. Ocel

Ocel společně se surovým železem, bílou a šedou litinou a ocelolitinou spadá materiálově pod skupinu železných kovů. Ocel se dělí podle různých parametrů, na příklad podle chemického složení rozlišujeme ocel nelegovanou (uhlíkovou), která obsahuje převážně uhlík a ocel legovanou, která záměrně obsahuje prvky jako Mo, Ni, Cr, W, V, Ti atd. Dalším dělením podle chemického složení je dělení na ocel obvyklé jakosti, jakostní a na ocel ušlechtilou. Ušlechtilá ocel vyžaduje vyšší stupeň čistoty, je pevnější, kalitelná, svařitelná a více houževnatá. ^[4]

Momentálně se ocel značí podle národních norem (ČSN) a podle evropských norem (EN). Stále se setkáváme i s označením podle starší normy ČSN 42 0002, jejíž označení má pětimístný kód. První 2 čísla jsou oddělené od ostatních mezerou a označují třídu oceli. Oceli třídy 10 a 11 označují konstrukční ocel a nelegovanou konstrukční ocel. Třída 12 označuje konstrukční ocel nelegovanou s pevně daným obsahem uhlíku. Třídy 13 až 17 značí konstrukční ocele legované. Do třídy 15 řadíme ocel, která je odolná atmosférické korozi a je legovaná Cr, Ni, Cu a P. Třída 17 označuje korozivzdornou ocel, která obsahuje min 12% chromu. Následující čísla více charakterizují ocel podle jejich mechanických a jiných vlastností. ^[4]

Vlastnosti oceli jsou závislé hlavně na zpracování oceli a na jejím složení. Hustota ocelí je v rozmezí 7830 – 7880 kg·m⁻³, modul pružnosti má hodnoty kolem 200 – 220 GPa, součinitel teplotní délkové roztažnosti nabývá hodnot 10·10⁻⁶ - 12·10⁻⁶ a Poissonův součinitel je 0,3 a měrná tepelná kapacita 0,46 kJ·kg⁻¹·K⁻¹. Nad 300°C pevnost oceli klesá, při 500°C zhruba na 50% a ztrácí se vyznačená mez kluzu. Čím vyšší teplota oceli, tím menší modul pružnosti. Při vyšší teplotě se také mění tažnost tak, že ze začátku klesá a pak roste. Pokud je ocel namáhána opakovaně, pevnost klesne na hodnotu meze únavy, což je 30 – 40 % původní meze pevnosti. ^{[4], [5]}

1.1.1. Legování

Abychom dosáhli požadovaných vlastností oceli, přidávají se do materiálu různé legující prvky, tzv. legury. Samotnému metalurgickému procesu říkáme legování. Podle

množství legujících prvků rozlišujeme oceli nízkolegované, které obsahují maximálně 4% jiných kovů, středně legované s obsahem jiných kovů v rozmezí 5 – 10 % a vysokolegované s obsahem jiných kovů nad 10 %. Korozivzdorné oceli se řadí do vysokolegovaných oceli. [5, 6]

Největší vliv na vlastnosti oceli má obsah uhlíku. Ovlivňuje mezi jinými pevnost, tvrdost, kalitelnost (čím více C, tím větší pevnost, ale klesá plasticita a houževnatost). Mezi nežádoucí prvky patří síra, která tvoří sulfidy a do oceli se dostává z rud a paliva. Má sice kladný vliv na obrobiteľnosť, ale zeslabuje soudržnosť austenitických zrn. Dalším nepříznivým prvkem je kyslík, kvůli kterému je ocel náchylnější ke křehnutí při stárnutí a k bodové korozi a taky výrazně mění vrubovou houževnatost. Fosfor zase způsobuje popouštěcí křehkost, zhoršuje tvářitelnost a stejně jako kyslík zhoršuje vrubovou houževnatost. Dusík se do oceli dostává z pecní atmosféry a kvůli němu se v oceli tvoří mezikrystalická koroze pod napětím. Při výrobě oceli a při svařování se do oceli dostává vodík, který způsobuje vodíkovou korozi, snižuje mez pevnosti a tažnost. Mezi další nežádoucí prvky patří arsen, antimon, olovo a cín. [5, 6]

Kromě nežádoucích prvků, které se snažíme z oceli odstranit, existují i takové, které se snažíme v oceli uchovat. Mezi ně patří mangan, který zvyšuje pevnost a tvrdost. Váže na sebe kyslík a síru, má výborný desoxidační účinek. Dalším prospěšným prvkem je křemík, který je taky desoxidační a navíc zvyšuje pevnost a tvrdost. [5, 6]

Dále existují i takové prvky, které do oceli přidáváme záměrně. Přidává se mangan, chrom, nikl, molybden, vanad, wolfram, křemík, hliník, bór, cín, kobalt, měď, niob a tantal. [5, 6]

1.1.2. Zkoušení

Mechanické vlastnosti oceli jsou nesmírně důležitým parametrem, který určuje, zda se daný materiál bude používat či nikoliv. Právě mechanické vlastnosti nám řeknou, zda materiál vydrží předpokládané dynamické či statické namáhání. Se vzrůstající potřebou vyvíjet ocel se stále lepšími mechanickými vlastnostmi, která bude odolnější při dynamickém namáhání, je potřeba najít způsob, jak lze tyto vlastnosti zkoušet. Rozlišujeme zkoušky statické a dynamické. Mezi nejpoužívanější zkoušky patří zkouška

rázem v ohybu podle Izoda nebo Charpyho, zkouška tlakem nebo tahem a zkoušky tvrdosti.^[7]

1.2. Dynamické zkoušky

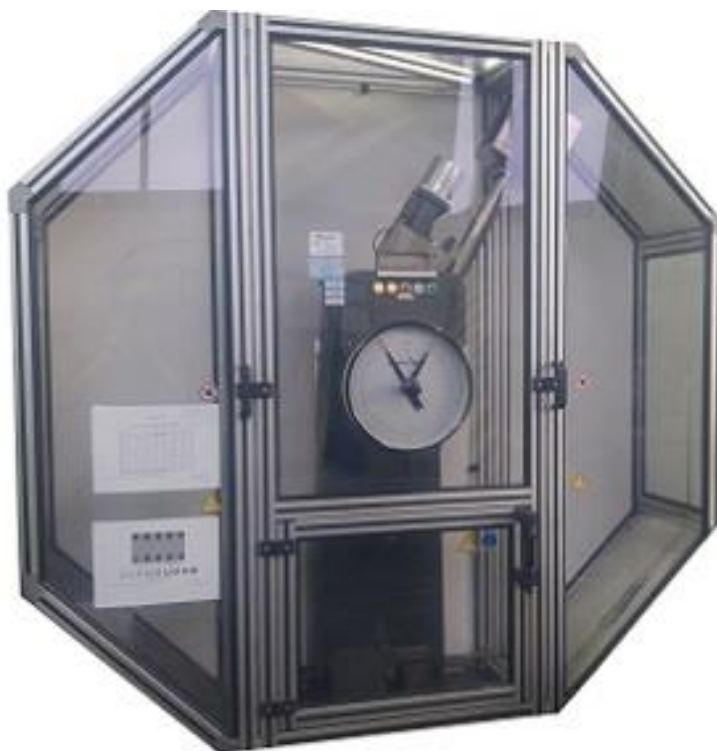
Typickým znakem dynamických zkoušek je rychlé zatěžování. Mění se skokem, rázem nebo se opakuje v různých cyklech. V průběhu dynamických zkoušek nastává destrukce soudržnosti materiálu. A to i přes to, že zatěžující síla je mnohem menší než velikost síly, která odpovídá statické pevnosti. Cílem dynamického zkoušení je určení mnoha vlastností materiálu za působením dynamických sil. Dynamické zkoušky rozlišujeme na rázové a únavové zkoušky (nebo taky zkoušky při cyklickém namáhání). Rázovou zkoušku dále dělíme podle způsobu zatěžování na zkoušku:

- v ohybu (dynamická účinnost větru),
- v tahu (zatěžování lana výtahu),
- v tlaku (úder kladívka),
- v krutu (hřídel).

Nejpoužívanější zkouška je zkouška rázem v ohybu. Přináší kvalitní informace o houževnatosti či křehkosti materiálu. Posuzuje reakci materiálu na rázové zatěžování neboli houževnatost. Houževnatost je materiálová vlastnost, která popisuje schopnost setrvat při ohýbání a nárazech vcelku bez tvorby prasklin. Mezi nejběžněji používané patří zkouška podle Charpyho. Při zkoušce rázem v ohybu se určuje materiálová charakteristika zvaná nárazová práce. Hodnotí se citlivost materiálu na koncentraci napětí v místě vrubu na tyčince. U tepelně zpracovaných ocelí nebo v místě svarů je parametr vrubové houževnatosti velmi důležitý.^{[7], [8], [9]}

1.2.1. Zkouška rázem v ohybu^{[9], [10]}

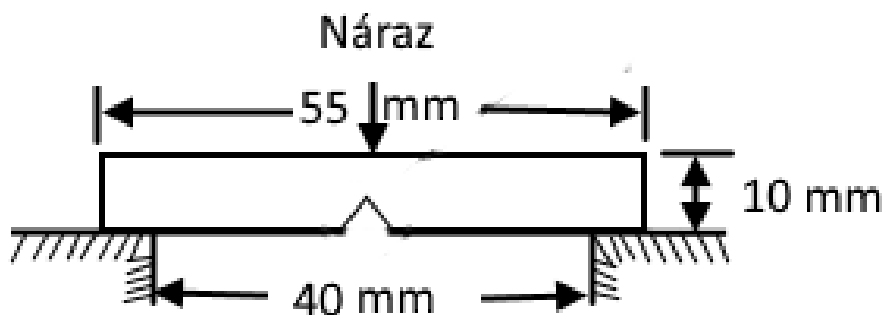
Zkoušku rázem v ohybu metodou Charpyho upravuje norma ČSN ISO 148-1 (420381). Je to nejstarší a v praxi nejoblíbenější zkouška, která hodnotí odolnost oceli proti křehkému lomu. Obrázek č. 1 je fotografií Charpyho stroje.^[4]



Obrázek č. 1: *Reálná fotografie Charpyho stroje. Převzato z [11].*

Podstatou Charpyho zkoušky je přeražení zkušební vzorku – tyčinky s vrubem. Přeražení je provedeno za předem určených podmínek jedním rázem kyvadlového kladívka. Uprostřed zkušební vzorku je vrub se stanovenou geometrií podle normy. Úder kladívka je vždy na protilehlou stranu k vrubu. Parametr získaný ze zkoušky je energie, která je při rázové zkoušce absorbována. Zkouška se provádí při definované teplotě. Nejběžněji se používá zkoušení za pokojové teploty, dále - 60 °C nebo + 60 °C. [10], [12]

Každý zkušební vzorek musí mít délku 55 cm, šířku a výšku 10 mm, jak je znázorněno na obrázku č. 2. Vrub může mít tvar V nebo U a musí být ve středu zkušební tělesa. V prvním případě musí mít úhel 45°, hloubku 2 mm a poloměr kořene 0,25 mm. U-vrub musí mít hloubku 5 mm a poloměr kořene 1 mm. V-vrub se používá především u materiálů, které vykazují tranzitní lomové chování – zejména u svařitelných ocelí tvářených i na odlitky nebo u tvárných litin. U-vrub se využívá u legovaných ocelí, perlitických ocelí a dále. Pokud jde o tepelně zpracovaný materiál, finální mechanické provedení vzorku musí být zpracováno až po konečném tepelném zpracování. [10], [13]



Obrázek č. 2: Rozměry vzorku.

Zkušební postup je opět definovaný normou. Vzorek se vloží proti operám zkušebního stroje s maximálním možným vystředěním. Při testování může dojít k několika nestandardním porušením vzorku, na příklad překročení kapacity stroje, neúplný lom nebo zaklínění zkušebního tělesa. Výsledky se vyjadřují v jednotkách energie – Joulech.

Materiálová charakteristika^{[10],[13],[12]}

Provedením zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy určujeme materiálovou charakteristiku zvanou **nárazová práce**. Je to jediná veličina, která se podle platné normy (ČSN ISO 148-1) u výše uvedené zkoušky určuje. Nárazová práce je závislá na druhu materiálu a na teplotě zkušební vzorku. Nárazovou práci označujeme symboly KU – pokud se jedná o vzorek s U vrubem nebo KV – pokud se jedná o vzorek s V vrubem. Označení KV = 140 J znamená, že Charpyho kladívko s počáteční energií 300 J vykonalo práci o velikosti 140 J na vzorku s vrubem ve tvaru V. Pokud má kladívko počáteční energii jinou než 300 J a zkušební vzorek má jiné rozměry, změní si i zápis výsledku. Na příklad zápis KV 120/6,5 = 95 J znamená, že kladívko mělo počáteční energii 120 J, tloušťka zkušební tyče s V vrubem byla 6,5 mm a nárazová práce byla určena 95 J. ^{[10],[13]}

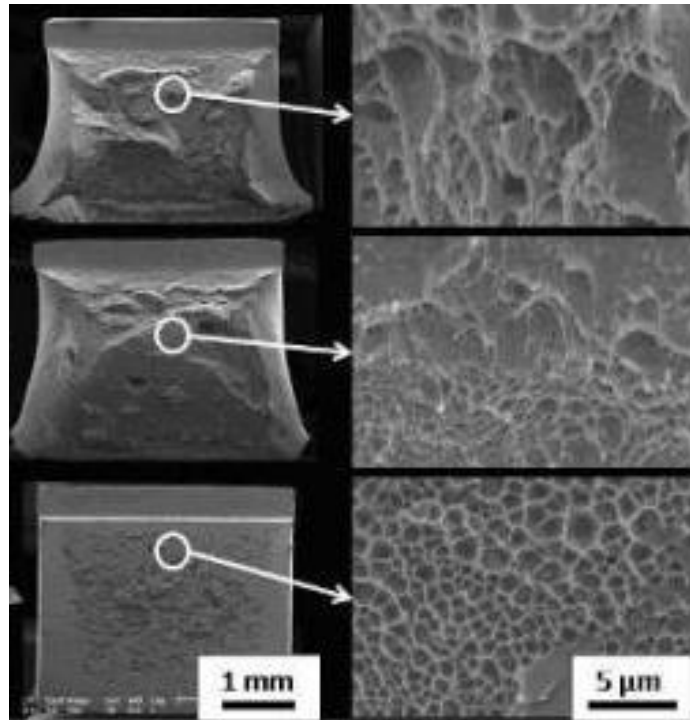
Další možnou charakteristikou získanou ze zkoušky rázem v ohybu metodou Charpy je **vrubová houževnatost**. Určuje se jako podíl nárazové práce k ploše průřezu pod vrubem, má jednotky J/cm². Určení vrubové houževnatosti není v souladu s platnou normou ČSN EN 10045-1 (42 0381), nicméně v České republice se často určuje. Houževnatost je vlastnost materiálu pohlcovat mechanickou energii. ^{[10],[5],[13]}

Kromě vrubové houževnatosti se hodnotí i **vzhled lomové plochy**. Rozlišujeme křehký lom, houževnatý lom a lom smíšený. V případě křehkého lomu lomová plocha není

deformovaná a jsou na ni vidět větší krystalky, zkušební tyčinka se zpravidla rozlomí na dva kusy, viz obrázek č. 4 a). U houževnatého lomu je již deformace lomové plochy značná, tyčinka se nerozlomí, zůstane v kuse a bude ohnutá, viz obr. č. 4 b). Smíšený lom je dán kombinací křehkého a houževnatého lomu (obr. č. 4 c)). Aby byla zkouška platná, musí na tyčince vzniknout lom. ^{[10],[13]}



Obrázek č. 3: Podíl křehkého a houževnatého lomu. Převzato z [14].



Obrázek č. 4: a) Houževnatý lom. b) Houževnatý lom s náznakem křehkého. c) Křehký lom.
Převzato z: [15]

Výstupní hodnoty^[16]

Výsledkem měření hodnot spotřebované práce v závislosti na teplotě zkušebního vzorku je **tranzitní křivka**, viz obr. č. 3. ^[16]

Vlastnost, která určuje porušení (na příklad velikost plastické deformace, velikost energie, která je zapotřebí k porušení, podíl tvárného lomu), se může plynule měnit, pokud se změní faktory procesu porušení, děje se tak u kovů a slitin s kubickou plošně centrovanou mřížkou (FCC) (hliník, měď, austenitické oceli), nebo s hexagonální těsně uspořádanou mřížkou (HCP) (hořčík, kadmium). ^[16]

Porušení může nastat i rychlým přechodem z křehkého do houževnatého stavu. Stává se tak u kovů s kubickou prostorově centrovanou mřížkou (BCC), na příklad uhlíkové, nízkolegované a střednělegované oceli, titan, chrom, molybden). Okamžitý přechod z houževnatého na křehký lom je patrný u ocelí 11 373 (konstrukční ocel obvyklé jakosti) v přechodové oblasti - 10°C – 0°C. Pod - 10°C se oceli 11 373 lámou křehce, nad 0°C pak houževnatě. Nad 350 °C pak dochází ke snížení energie v oblasti creepu materiálu. ^[16]

1.3. Statické zkoušky

U statických zkoušek dochází k pomalému zatěžování materiálu až na předem definovanou hodnotu. Mezi statické zkoušky patří zkouška tahem, tlakem, ohybem, krutem, stříhem nebo vnikací zkoušky.

1.3.1. Tahová zkouška

Zkoušku tahem za pokojových teplot upravuje norma ČSN EN ISO 6892-1. Z dané zkoušky můžeme získat velké množství mechanických vlastností, jako je modul pružnosti, mez kluzu, mez pevnosti, tažnost, kontrakce a další. ^[17]

Principem zkoušky je deformace zkoušeného materiálu, většinou až do bodu lomu, z důvodu získání mechanických vlastností materiálu. Zkouška se provádí za pokojových teplot, tj. $23\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. Zkouška za snížených nebo zvýšených teplot je možná, pro tuto práci však zanedbatelná a upravuje ji jiná norma. ^[17]

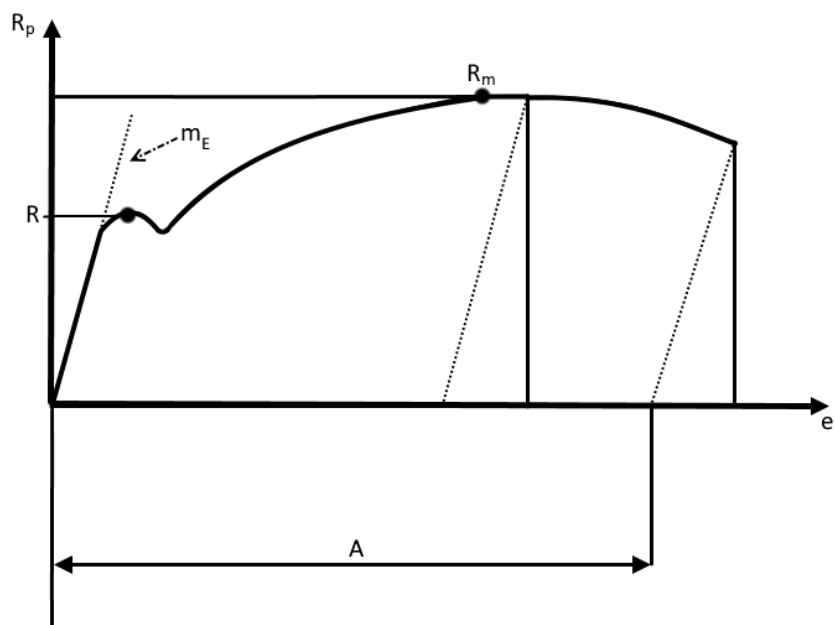
Zkušební materiál může mít různé tvary a rozměry podle toho, z jakého tělesa je vzorek odebrán. Získává se obráběním z výrobku, vylisku nebo odlitku. Lze zkoušet i neobrobené vzorky, a to výrobky s konstantním průřezem (profily, dráty, tyče) nebo litá zkušební tělesa. Zkušební vzorky mívají průřez kruhový, čtvercový, obdélníkový, prstencový nebo ve výjimečných případech i jiný tvar. Vztah mezi počáteční délkou vzorku L_0 a počátečním průřezem plochy S_0 je definován rovnicí (1)

$$L_0 = k\sqrt{S_0} \quad (1)$$

Kde k je součinitel proporcionality, který pro zkušební těleso delší než 15 mm je roven $k = 5,65$. Upínací konce vzorku se přizpůsobují upínacím čelistem zkušebního stroje, dle normy mohou mít libovolný tvar. Podmínkou je, aby se osa zkušebního tělesa shodovala s osou aplikovaného zatížení. Počáteční měřená délka se určuje s přesností $\pm 1\%$. ^[17]

Před samotným zkoušením a upnutím vzorku na obou koncích je potřeba sestavit zkušební zatěžovací soustavu a nastavit ji na nulu. Během zkoušky se nulový bod již nemění. ^[17]

Výsledkem zkoušky tahem je tahový diagram, zobrazený na obrázku 5:

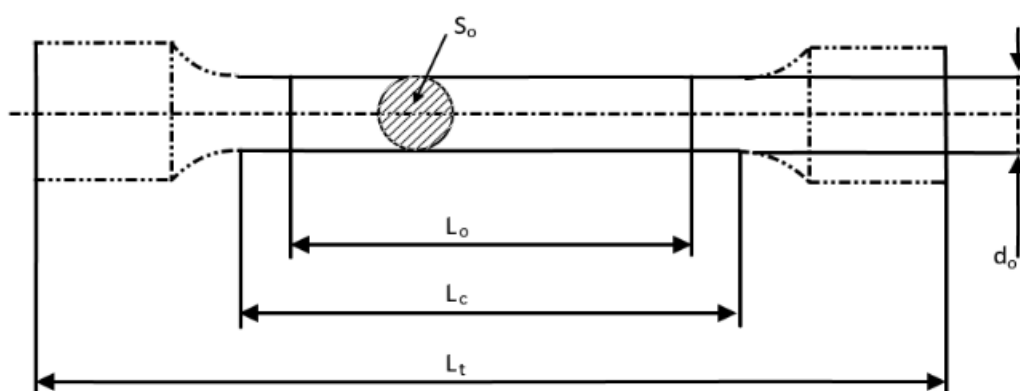


Obrázek č. 5: Tahová křivka.

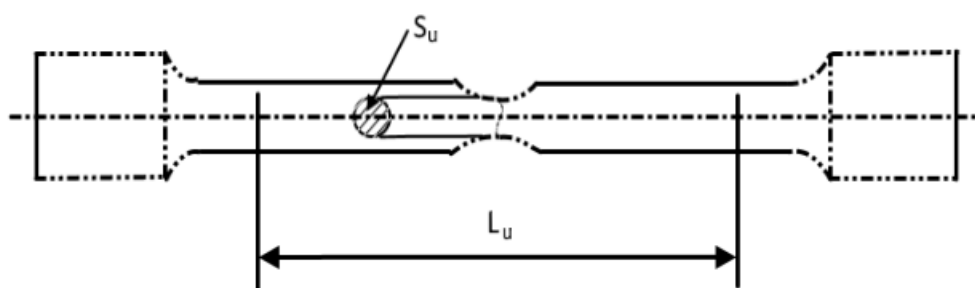
kde m_E je směrnice pružné části závislosti napětí – prodloužení v % měřené průtahoměrem, R_p je napětí měřené v MPa, e je prodloužení měřené průtahoměrem vyjádřené v %, R je mez kluzu, R_m je mez pevnosti, A je tažnost v %.^[17]

Zkušební vzorky používané pro tuto diplomovou práci měly kruhový průřez a definované parametry, které jsou zobrazeny na obrázku č. 6:

a) Před zkouškou



b) Po zkoušce



Obrázek č. 6: Zkušební tyčinky použité při zkoušce tahem.

kde d_0 je počáteční průměr zkoušené délky zkušebního tělesa kruhového průřezu, L_0 je počáteční měřená délka, S_0 je počáteční průřezová plocha zkoušené délky, L_c je zkoušená délka, L_t je celková délka zkušebního tělesa, L_u je konečná měřená délka po lomu a S_u je minimální průřezová plocha po lomu. ^[17]

Modul pružnosti lze vypočítat mnoha způsoby, jedním z nich je vzorec (2):

$$R_p = \frac{E \cdot e}{100\%} + b \quad (2)$$

kde R_p je napětí v megapascálech, E je modul pružnosti v megapascálech, e je prodloužení v procentech měřené prúťahoměrem a b je předepsaný úsek napětí v megapascálech. Nejistota měření je vyjádřena pomocí vzorce (3):

$$u_c(E) = \sqrt{\left(\frac{L_e}{S_0}\right)^2 \cdot u^2(S_E) + \left(\frac{S_E}{S_0}\right)^2 \cdot u^2(L_e) + \left(-\frac{S_E L_e}{S_0^2}\right)^2 \cdot u^2(S_0)} \quad (3)$$

Kde L_e je měřená délka průtahoměru, S_0 je počáteční průřezová plocha, S_E je směrnice závislosti zatížení-prodloužení měřené průtahoměrem, $u(L_e)$ je nejistota měřené délky průtahoměru, $u(S_0)$ je nejistota počáteční průřezové plochy a $u(S_E)$ je nejistota směrnice závislosti zatížení-prodloužení měřené průtahoměrem. [17]

1.4. Zkoušky tvrdosti – vtisková zkouška

Mezi neznámější zkoušky určující vlastností kovů jsou zkoušky tvrdosti. Tvrdost je vlastnost, která určuje odpor materiálu vůči plastické nebo elastické deformaci. Zkoušky měření tvrdosti lze rozdělit mnoha způsoby, jedním z nich je rozdělení na zkoušky vnikací a odrazové. [18]

Mezi vnikací zkoušky řadíme metody podle Brinella, Vickerse, Berkoviche, Rockwelle, kde se tvrdost určuje podle velikosti plastické nebo elastoplastické deformace vzorku. Vnikacím tělesům se říká indentory. Indentory jsou geometricky definované. Díky tomu je zajištěna kvalitní reprodukovatelnost zkoušky. Můžou být ve tvaru kužele, koule nebo jehlanu. Velikost indenterů závisí na zkoušce, ve které jsou používány – mikroindentory, nanoindentory. U vnikacích metod je tvrdost definována poměrem zatěžující síly a plochou vtisku, viz rovnice (5). [19, 20]

Jelikož zkouška se provádí na povrchu vzorku, materiál musí mít hladký a rovný povrch, který je bez cizích těles (nečistoty, prach) a mazadel. Tloušťka vzorku musí být větší než osminásobek hloubky vtisku h , aby nedošlo k ovlivnění měření. Vtisk musí být ve vzdálenosti od okraje vzorku minimálně 2,5 násobku průměru vtisku (v případě oceli, litiny, mědi a její slitiny) nebo 3 násobku průměru vtisku (pro lehké kovy, olovo, cín a její slitiny). Dále musí být vzdálenost středů dvou sousedních vtisků větší než 4 násobek průměru vtisku (v případě oceli, litiny, mědi a její slitiny) nebo 6 násobek průměru vtisku (pro lehké kovy, olovo, cín a její slitiny). [18, 20]

Vnikací zkoušky se provádí nejčastěji při pokojových teplotách, tj. 20°C. Podle velikosti a odhadované tvrdosti vzorku se volí i velikost a druh indenteru. Stejně tak se podle velikosti vzorku používá odpovídající zátěž. Zatěžuje se tak, aby průměr vtisku d byl v rozmezí hodnot $0,24 D - 0,6 D$. [18, 20]

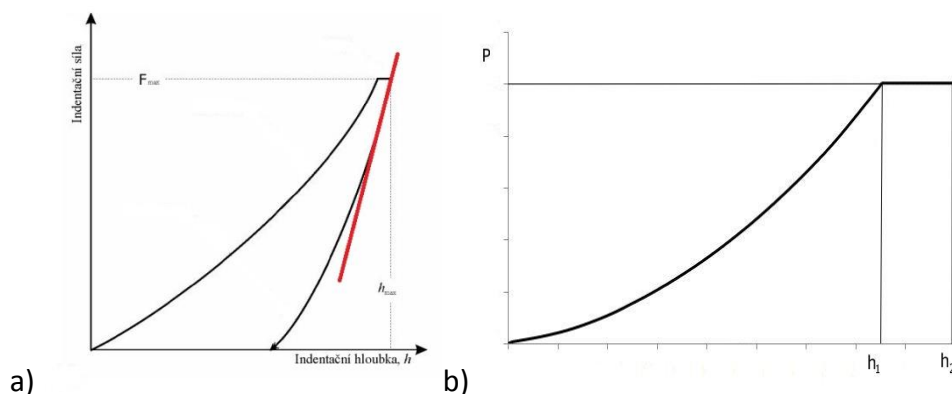
V průběhu zkoušky musí být vzorek nehybně položen na tuhé podložce (mikroindentace) nebo pevně uchycen na určeném místě (nanoindentace). Samotné

zkoušení se skládá ze 3 částí. V první části indentor vniká do vzorku kolmo k povrchu po předem definovanou dobu a s předem definovanou silou. Následně indentor setrvává ve vzorku po určitou, definovanou dobu a v poslední části dochází k odlehčení zátěže. Následuje vyhodnocování. V případě mikroindentace se měří průměr každého vtisku ve dvou na sebe kolmých směrech. Tvrdost se určuje průměrnou hodnotou velikostí vtisků. [18, 20]

Nanoindentace jako vtisková zkouška

Nanoindentace je indentační (vnikací) test, kde hloubka vniknutí indentoru do vzorku je měřená v nanometrech (10^{-9} m) místo obvyklých mikrometrů (10^{-6} m) nebo ještě obvyklejších milimetrů (10^{-3} m). Typickým rysem nanoindentace je kromě zmenšeného měřítka nepřímé měření oblasti doteku indentoru a vzorku. V obyčejných indentačních testech je oblast doteku vypočítaná na základě výsledků měření zbytkového vtisku zanechaného ve vzorku po odstranění zátěže. V nanoindentačních testech je běžně velikost vtisku v řádech mikronů, takže je příliš malá na to, aby se dala bez obtíží změřit přímo. Je tedy běžné určit styčnou plochu změřením hloubky průniku indentoru do povrchu vzorku. To nám pomůže spolu se známou geometrií indentoru nepřímo změřit oblast doteku při plném zatížení. [21, 22]

Z nanoindentačního testu nezjistíme jenom tvrdost materiálu, ale i modul pružnosti, koeficient deformačního zpevnění, pevnost do zlomu a viskoelastické vlastnosti. Obrázek (7) ukazuje data, které dostaneme, když sférický nebo konický indentor tlačíme na hladký povrch vzorku s neustále se zvyšující zátěží. Pro každý přírůstek zátěže se zaznamenává velikost zátěže i hloubka vtisku. Po aplikaci maximální zátěže se zátěž plynule odstraňuje a současně se zaznamenává hloubka průniku. Zatěžující část indentačního cyklu může obsahovat počáteční elastický kontakt, po kterém při větších zatíženích následuje plastická deformace na vzorku. Pokud plastická deformace nastane, křivka, která zaznamenává hloubku vtisku při odstraňování zátěže, bude mít jinou dráhu než křivka, která předtím zaznamenala aplikaci zátěže a ve vzorku zůstane zbytkový vtisk. Pro určení modulu pružnosti a tvrdosti použijeme tangentský sklon odlehčovací křivky v bodě maximální zátěže, která popisuje odstraňující se zátěž a maximální hloubku vtisku pro konkrétní zátěž, viz obrázek č. 7. V některých případech je možné k měření modulu pružnosti použít také zatěžující křivku. [21, 22]



Obr. č. 7: a) tangentský sklon křivky; b) viskoelastické chování tuhého materiálu.

Převzato z [19].

Pro viskoelastické materiály nebývá závislost mezi zátěží a hloubkou vtisku lineární. Pro danou zátěž může výsledná hloubka průniku záviset na rychlosti zatěžování a na velikosti zátěže. Pro takové materiály je indentační zkouška doprovázená creepem, který se projeví změnou hloubky vtisku při konstantním zatížení, jak je zobrazeno na obrázku (7 b)). V křehkých materiálech může vzorek prasknout, obzvláště při použití pyramidového indentoru, jako třeba trojboký Berkovichův nebo čtyřboký Vickersův indentor.^[19, 21, 22]

1.4.1. Brinellova zkouška tvrdosti

Brinellovu zkoušku tvrdosti upravuje norma ČSN EN ISO 6506-1^[23]. Podstatou zkoušky je vnikání indentoru ve tvaru kuličky o průměru D do povrchu zkoumaného materiálu. Po odstranění zátěže zůstane ve vzorku vtisk o průměru d . Tvrdost podle Brinella se označuje HB (HBS, HBW, HBN) a vypočítá se ze vzorce (4):

$$HB = \frac{2P}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (4)$$

kde P je zatěžující síla, D průměr zatěžující kuličky a d průměr vtisku.^[21, 23]

1.4.2. Vickersova zkouška tvrdosti

Vickersovu zkoušku tvrdosti upravuje norma ČSN EN ISO 6507-1.^[24] Podstatou zkoušky je vnikání diamantového indentoru ve tvaru pravidelného čtyřbokého jehlanu

se čtvercovou základnou a definovaným vrcholovým úhlem (136°) do povrchu vzorku. Měří se úhlopříčka vtisku, která zůstane v neznámém materiálu po odstranění zátěže. [21]

Vickersova tvrdost se označuje HV , vyjadřuje se bezrozměrně a je daná podílem síly F a povrchu vtisku A

$$HV = \frac{F}{A}. \quad (5)$$

Povrch vtisku se vypočítá ze vzorce

$$A = \frac{u^2}{2 \cos(22^\circ)} = \frac{u^2}{1,8544} \quad (6)$$

po dosazení

$$HV = \frac{0,189 F}{u^2}, \quad (7)$$

kde u je úhlopříčka vtisku v mm vyjádřená jako střední hodnota

$$u = \frac{u_1 + u_2}{2}.$$

Výhodou Vickersovy metody je fakt, že výsledky tvrdosti teoreticky nezávisí na velikosti zatížení, protože rozdílně velké vtisky si jsou navzájem geometricky podobné. To je důvod, proč jsou v určitém rozsahu zatížení naměřené hodnoty HV stejné. Při velice malých nebo naopak velice velkých zatíženích závisí hodnoty HV na velikosti dopružování, neboli na deformačním zpevnění zkoušeného kovu. [16, 21, 24]

Kickův zákon o stálosti hodnoty tvrdosti při změně zatížení F zní:

$$F = a \cdot u^2, \quad (8)$$

kde F je zatížení, u je úhlopříčka vtisku a a je konstanta závisící na druhu zkoušeného materiálu a na tvaru vtláčejího tělesa. Při daném zkušební indenteru bude $a = konst.$

Z toho vyplývá, že rovnice ($X = HV = \frac{0,189 F}{u^2}$) bude po úpravě:

$$HV = 0,189 \cdot a = konst.$$

Vickersovu tvrdost lze vypočítat i z hloubky vtisku, dosazením do povrchu vtisku

$$A = 4h_p^2 \operatorname{tg}^2 68^\circ = 24,504 h_p^2, \quad (9)$$

kde h_p je plastická hloubka vtisku. [16, 21, 24]

Vztah mezi HV a (Meyerovou) tvrdostí H_{IT} , která se nyní používá více, je přesně určen

$$HV = 94,5H . \quad (10)$$

Vickersovu tvrdost taky vypočítáme ze vzorce (11):

$$HV = 0,102 \frac{2P \sin \frac{136^\circ}{2}}{d^2} = 0,1891 \frac{P}{d^2} \quad (11)$$

kde P je zatěžující síla, d aritmetický průměr dvou délek úhlopříček v mm. Podle velikosti zatížení rozlišujeme Vickersovu zkoušku tvrdosti na 4 podoblasti:

- Zkouška tvrdosti podle Vickerse; $P \geq 49,03$ N; $\geq HV 5$
- Zkouška tvrdosti podle Vickerse při nízkém zatížení; $49,03$ N $> P \geq 1,961$ N; HV 0,2 až $< HV 5$
- Zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse; $1,961$ N $> P \geq 0,09807$ N; HV 0,01 až $< HV 0,2$
- Nanoindentační zkouška podle Vickerse; $P \approx 1$ mN

Zkušební zatížení je pro každou oblast pevně dané. Tloušťka vzorku nesmí být menší než 1,5 násobek délky úhlopříčky. ^[24]

1.4.3. Ostatní zkoušky tvrdosti

Rozlišujeme i další vnikací zkoušky tvrdosti. Patří mezi ně i zkouška tvrdosti s použitím Berkovichova hrotu, kde je indentorem trojboký jehlan s trojúhelníkovou základnou. Dále Rockwellova zkouška tvrdosti, která používá indentor ve tvaru kužele nebo kuličky. Ve zkoušce tvrdosti s Berkovichovým indentorem se využívá diamantový indentor ve tvaru jehlanu s trojúhelníkovou základnou. Plocha vtisku se vypočítá

$$A = 3\sqrt{3}h_p^2 \operatorname{tg}^2 \theta , \quad (12)$$

kde h_p je hloubka vtisku a $\theta = 65,27^\circ$, takže

$$A = 24,494 h_p^2 \approx 24,5 h_p^2 \quad (13)$$

a nakonec tvrdost se vypočítá:

$$H = \frac{P}{24,5 h_p^2}. \quad (14)$$

Původní Berkovichův indentor byl navržen tak, aby měl stejný poměr povrchu plochy k indentační hloubce jako Vickersův indentor a aby měl vrcholový poloúhel roven 65,27°. Pro obě zkoušky – Vickersovu i Berkovichovu je typická reprezentativní deformace ve vzorku zhruba 8%.^[7, 20, 21, 25]

V Rockwellově zkoušce tvrdosti je indentorem diamantová kulička – sféra nebo diamantový bod. Maximální hodnota Rockwellovy tvrdosti je kolem 100. Tvrdost podle Rockwelle se vypočítá ze vzorce:

$$HRX = M - \frac{\Delta h}{0,002}, \quad (15)$$

kde $\Delta h = h_2 - h_1$ a M je horní limit stupnice měření. Pro obvyklou Rockwellovu tvrdost je $M = 100$ pro diamantový bod (stupnice A , C a D) nebo $M = 130$ při užití diamantové kuličky (stupnice B , E , M , R atd.). Tvrdost se označuje HRX , ale místo X se píše použitá stupnice, jako je 60 HRC, což je 60 bodů na stupnici C .^[7, 20, 25]

Ověřování a kontrola tvrdoměrů

Každý tvrdoměr by měl být ověřen. Obzvláště, pokud se nejedná jenom o orientační měření, ale o měření, které se uvádí v dokladech nebo jim určujeme jakost výrobku. Tvrdoměry patří mezi tzv. stanovená měřidla, které je potřeba v pravidelných intervalech podrobit ověření Českému metrologickému inspektorátu (ČMI). Daný orgán tvrdoměr přímo zkontroluje, tedy ověří velikost zkušebního zatížení, používané vnikací tělesa a přezkoumá měřící a vyhodnocovací zařízení tvrdoměru. Při splnění všech požadavků EN pro ověřování tvrdoměrů je tvrdoměr opatřen štítkem s úřední značkou deklarující ověření přístroje a je vystaven písemný doklad o ověření. Na štítku i dokladu lze najít datum platnosti ověření. Platnost ověření končí uplynutím doby platnosti ověření, pokud jsou na tvrdoměru provedeny změny, které mohou ovlivnit jeho metrologické vlastnosti, pokud je tvrdoměr nějak poškozen nebo pokud je zřejmé, že ztratil požadované metrologické kvality.^[20]

Před každým měřením je potřeba tvrdoměr zkontrolovat. Kontrolu provádí uživatel sám nebo je k tomu určeno podnikové kalibrační a měrové středisko. Kontrolu je třeba provést i v případě, že se jedná pouze o kontrolní měření, na příklad ke kontrole

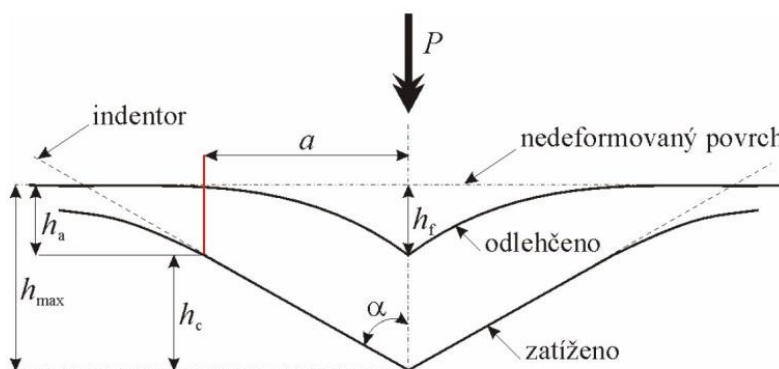
po zušlechtění povrchu polotovaru, kdy se jedná o pracovní měřidlo. Při kontrole se používají kalibrované sady tvrdoměrných destiček. Výstupem je určení odchylek tvrdoměru pro dané zkušební metody a vnikací tělesa, ze kterých se stanoví náležité hodnoty korekcí, a hlavně se zjistí spolehlivost přístroje – velikost rozptylu výsledků měření. [20]

1.2. Metoda Olivera a Pharra

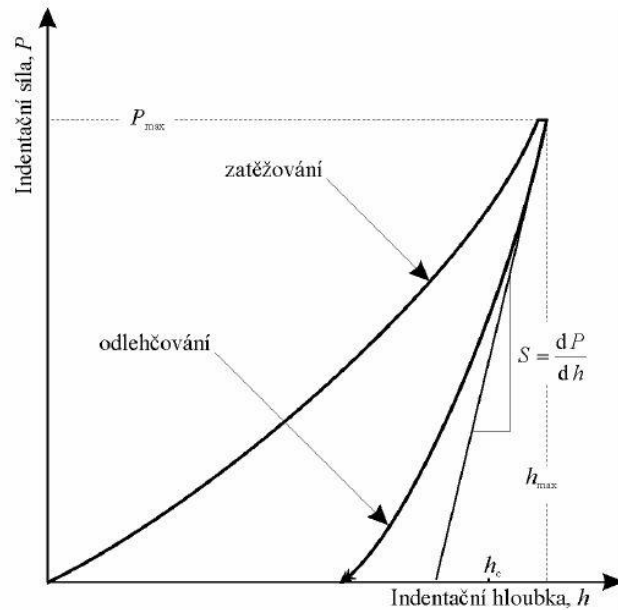
Podstatou nanoindentace je kontinuální záznam zatěžující síly P a hloubky h . Pro výpočet tvrdosti a modulu elasticity z dat získaných nanoindentační zkouškou se používá nejvíce metoda navržená Oliverem a Pharrem. [22]

Její metoda předpokládá elasticko-plastické zatěžování a elastické odlehčování. Měřenými veličinami jsou maximální zátěž P_{\max} , maximální indentační hloubka h_{\max} a kontaktní tuhost S , která je definována jako směrnice tečny začáteční části odlehčovací křivky. Veličiny jsou graficky znázorněny na obrázku č. 8. Odlehčovací fáze je aproximovaná mocninnou funkcí, která je popsána:

$$P = \lambda(h - h_f)^m. \quad (1)$$



Obr. 8: Schéma odlehčování indentoru. Převzato z [19].



Obr. 9: Indentační křivka. Převzato z [19].

Na obrázku č. 9 je zobrazena indentační křivka s popsányými veličinami. Tvrdost i modul pružnosti se stanovuje z odlehčovací části nanoindentační křivky, konkrétněji ze směrnice tečny křivky. Sklon odlehčovací křivky se vypočítá:

$$\frac{dP}{dh} = 2 \frac{2E^* \tan \alpha}{\pi} h_e, \quad (16)$$

kde E^* je efektivní (kombinovaný) modul pružnosti, který v sobě zahrnuje jak vlastnosti indentoru (E_i, ν_i), tak i vlastnosti vzorku (E, ν) a lze ho vypočítat:

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu^2}{E} + \frac{1 - \nu_i^2}{E_i}, \quad (17)$$

kde ν je Poissonova konstanta. Efektivní modul pružnosti E^* lze přepočítat na redukovaný modul pružnosti E_r :

$$\frac{1}{E_r} = \frac{1 - \nu^2}{E}. \quad (18)$$

Úpravou vzorce (dP/dh) dostáváme

$$P = \frac{1}{2} \frac{dP}{dh} h_e. \quad (19)$$

Po několika úpravách a korekcích, které jsou uvedeny v [17, 21, 22] získáme další vzorec pro efektivní modul pružnosti:

$$E^* = \frac{1}{2} \frac{dP}{dh} \sqrt{\frac{\pi}{A_p(h_c)}}, \quad (20)$$

Kde A_p je tvarová funkce hrotu, h_c je kontaktní hloubka.^[21, 22]

1.5. Tepelné zpracování kovu

Základním principem zpracování kovu je jeho ohřev na předem danou teplotu, následná výdrž na žíhací teplotě a ochlazení materiálu.

Tepelné zpracování může být rovnovážné nebo nerovnovážné. Rovnovážné tepelné zpracování je žíhání, které může být buďto bez překrytalizace nebo s překrytalizací. Nerovnovážné tepelné zpracování je kalení nebo popouštění a zušlechťování.^[26]

1.5.1. Žíhání bez překrytalizace

U žíhání bez krytalizace teplota žíhání je pod teplotou A_{c1} . K fázovým přeměnám nedochází, jen se může změnit způsob rozložení cementitu a feritu. Po určité době výdrže na žíhací teplotě následuje pomalé ochlazování v peci.^[26]

1.5.2. Žíhání na odstranění pnutí

Cílem tohoto druhu žíhání je odstranění vnitřního pnutí bez změny struktury a vlastností oceli. Vnitřní pnutí vzniká jak nerovnoměrným ochlazováním po tepelném zpracování (tváření za tepla, svařování), tak i po tváření za studena (rovnání, obrábění). Žíhání na odstranění pnutí se provádí ohřevem na nižší teplotu než je teplota A_{c1} (400 – 600 °C) výdrží na teplotě a následné pomalé ochlazení.^[26]

1.5.3. Rekrystalizační žihání

Cílem rekrystalizačního žihání je obnovení tvárných vlastností oceli po tváření za studena. Provádí se při teplotě 550 – 700 °C a nesmí překročit teplotu A_{c1} . Tímto žiháním se dosahuje zjemnění.^[14, 26]

1.6. Chemickotepelné zpracování

Základním principem chemickotepelného zpracování oceli je úmyslná změna chemického složení povrchu oceli. Rozlišujeme 2 hlavní způsoby – cementování a nitridování. Cílem je zvýšení tvrdosti povrchu materiálu a jeho odolnosti proti opotřebením. Chemické složení povrchu materiálu lze změnit jeho ohřevem v aktivním prostředí, kde se povrch obohacuje uhlíkem (cementování), dusíkem (nitridování), sírou (sulfidování) nebo kombinací prvků (nitrocementace, sulfonitridace). Tyto prvky poté difundují i do vrstev pod povrchem.^[7, 14, 26]

1.6.1. Cementování

Sycení povrchu uhlíkem, který je v pevném nebo tekutém stavu při teplotě nad A_{c3} se odborně nazývá cementování. Pokud je povrch nauhličený správně, nachází se v jeho obsahu 0,85% uhlíku. Hloubka cementace je do 1 mm, výjimečně až 2 mm. Pokud je v cementované vrstvě více než 1% uhlíku, vyloučí se nadeutektoidní karbidy. Ty nejsou žádoucí, protože pokud se rozloží na hranicích zrn, značně snižují houževnatost cementované vrstvy. Obsah a rozložení uhlíku v cementované vrstvě závisí na cementační teplotě, době výdrže na cementační teplotě, použitém cementačním prostředí a na chemickém složení cementovaného materiálu, obzvláště na obsahu uhlíku a karbidotvorných prvků. Rozlišujeme tuhé a kapalné cementační prostředí.^[14, 26]

Dnes méně používané tuhé cementační prostředí je práškovou směsí dřevěného uhlí a uhličitanu barnatého v poměru cca 5 : 1. Čím více uhličitanu barnatého, tím je prostředí aktivnější, cementace tedy probíhá rychleji, ale hrozí riziko, že povrchová vrstva bude mít větší obsah uhlíku než je žádoucí. Dalším faktorem ovlivňujícím rychlost cementace je velikost dřevěného uhlí. Pokud jsou kousky velké, mají malou plochu povrchu a nauhličováním oceli je pomalé. Stejně tak se rychlost cementace snižuje, pokud je

cementační prostředek ve formě prášku. Nejvhodnější velikost dřevěného uhlí je zhruba 5 mm. [14, 26]

Druhým způsobem cementace je použití kapalného cementačního prostředí. Jedná se o jedovaté solné lázně, které se skládají zejména z chloridu sodného, chloridu draselného, chloridu barnatého a kyanidu sodného. Tento způsob cementace je vhodný pro menší součásti nebo tehdy, pokud je požadována menší tloušťka cementované vrstvy. Pro větší součásti i pro objemnější výrobu je nejvýhodnější použít plynné cementační prostředí. Na oceli se aplikuje směs oxidu uhelnatého s metanem. V tomto případě lze aktivitu prostředí přesně kontrolovat i řídit. [7, 14, 26]

Při cementování je potřeba použít teplotu vyšší než je teplota v bodě A_{c3} pro danou ocel. Pokud se cementuje v tuhém prostředí – prášku, využíváme teplot do 900°C. Cementování v plynu probíhá při teplotách 900 – 950°C. Čím je vyšší teplota cementování, tím je zrno hrubší, cementace je hlubší a na povrchu je větší obsah uhlíku. [26]

Hloubka cementované vrstvy se ovlivňuje dobou cementace. Obecně platí, že při cementaci v prášku se za 1 hodinu výdrže na dané teplotě zvětší hloubka cementace o 0,1 mm. Doba cementace v solných lázních nebo v plynu je kratší, hlavně kvůli vyšším používaným teplotám. [26]

Dalším faktorem ovlivňující cementaci je chemické složení cementované oceli. Pokud má ocel nižší obsah uhlíku, bude cementace probíhat rychleji než u oceli s vyšším obsahem uhlíku. Hloubka cementace bude stejná, jen v oceli s nižším obsahem uhlíku bude mít cementační vrstva více uhlíku. Obsah uhlíku na povrchu cementované vrstvy lze zvýšit použitím chromu nebo jiných karbidotvorných prvků. Oceli s titanem nemají sklony k zhrubnutí zrna, lze je tedy cementovat až do 1150°C a tím podstatně zkrátit dobu cementace. Další možností zkrácení doby cementace je použití niklu. [26]

Abychom dosáhli větší tvrdosti povrchu je potřeba po cementaci ocel dále tepelně zpracovat. Následuje tedy kalení a popouštění. Nejjednodušší je kalit ocel rovnou z cementační teploty. Ta je ale velice vysoká, cementační vrstva je ještě křehká a hrozí vznik trhlin. Dalším způsobem je kalení při 780 – 820°C po předchozím ochlazení součástí. V tomto případě je nauhličená vrstva jemnozrnná, tvrdá a houževnatá, nicméně jádro je velmi podkalené. Z tohoto důvodu se více namáhané součásti po cementování kalí dvakrát. Prvně z vyšší a podruhé z nižší kalící teploty odpovídající teplotě kalení cementované vrstvy. Druhé kalení se realizuje většinou v termální lázni při teplotě těsně

nad bodem M_s cementované vrstvy. Mezi dvěma kaleními se ještě provádí žíhání, které sníží tvrdost před obráběním, zmenší deformaci při druhém kalení a způsobí jemnější přechod mezi cementovanou vrstvou a jádrem. [14, 26]

1.6.2. Nitridování

Nitridování je postup, při kterém se povrch oceli obohacuje dusíkem v plynném či kapalném prostředí při teplotě pod A_{c1} , tj. 470 – 580 °C. Opracování a tepelné zpracování se provádí před samotnou nitridací. Nitridováním získá materiál tenkou a velice tvrdou povrchovou vrstvu, která je odolná proti otěru a zvyšuje odolnost součástí proti únavě i korozi. Po procesu nitridace již není potřeba dalšího tepelného zpracování oceli. [14, 26]

Během nitridace do povrchové vrstvy oceli vnikají nitridy, které vytváří okolní dusík. Nitridy zvyšují její tvrdost. Největší zvětšení tvrdosti je u ocelí obsahujících chrom a hliník, menší pak u ocelí uhlíkových. Nejvhodnější výchozí struktura před procesem nitridace je sorbit. Naopak nevhodný povrch pro nitridování je povrch oduhličený. Snížení kvality nitridované vrstvy způsobuje i ferit, který se vyloučí na hranicích zrn u podkalených ocelí nebo jenom normalizačně žíhaných ocelí. Dalším nevhodným materiálem jsou oceli měkce žíhané, protože se v nich nachází větší souvislá pole feritu a navíc kvůli měkkému podkladu se tenká nitridovaná vrstva může prolomit. Z tohoto důvodu je nitridace nejvýhodnější u oceli zušlechťených a obrobených. [14, 26]

Pro dosažení největší tvrdosti povrchu musí být teplota nitridace 480 – 500 °C. Při této teplotě nicméně dusík difunduje velice pomalu. K dosažení větší hloubky nitridace je potřeba dlouhá doba výdrže na daných teplotách. Na příklad k vytvoření 0,3 mm hloubky nitridované vrstvy je potřeba 20 hodin výdrž, pro 0,6 mm je to 70 hodin. Čím větší je teplota nitridace, tím je tvrdost vrstvy nižší. Někdy se nitriduje nejprve při nižších teplotách a po určitém čase se teplota nitridace zvýší až na 600 °C. Čím je doba nitridace kratší a vrstva tenčí, tím je tvrdost povrchu větší. Naopak tlustší vrstva, která je získaná po delší době, již tak tvrdá není. Tvrdší povrch po nitridaci mají oceli, které jsou legované hliníkem, méně tvrdý povrch je naopak u oceli legovaných chromem. Pokud budeme nitridovaný povrch popouštět na teplotu až 600 °C, její tvrdost nezměníme. [26]

Nejčastěji probíhá nitridace plynným amoniakem (čpavek, NH_3), kdy atomární dusík vzniká rozkladem amoniaku při dotyku s povrchem oceli. Kromě toho lze nitridovat i v solných lázních. Tady se atomární dusík uvolňuje okysličováním kyanidu sodného nebo draselného. K nitridaci v plynném prostředí je potřeba nucenou cirkulací atmosféry a zvonovou pec s elektrickým vytápěním, která má uvnitř kovový, utěsněný plášť. ^[26]

2. PRAKTICKÁ ČÁST

V praktické části diplomové práce jsou uvedeny naměřená data s jejich analýzou. Ve Společné laboratoři optiky Univerzity Palackého v Olomouci a Fyzikálním ústavu Akademie věd ČR se prováděla nanoindentační zkouška. Zbylé zkoušky (zkouška rázem v ohybu, zkouška tahem a zkouška tvrdosti) se měřily v akreditované laboratoři firmy Enviform, a. s. se sídlem v Třinci.

2.1. Popis experimentálního zařízení

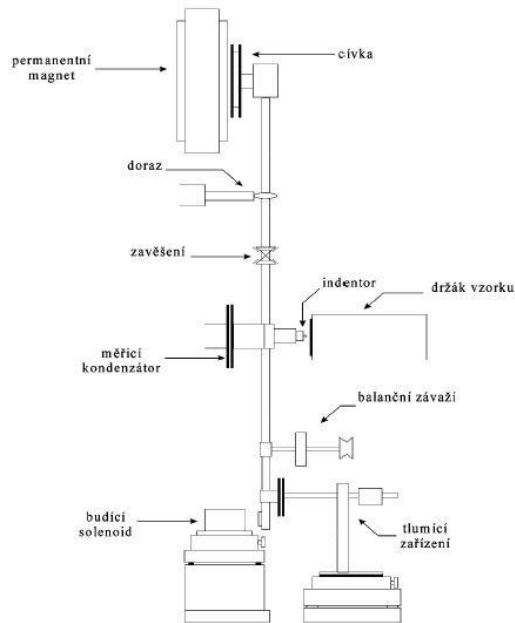
Experimentální data, která jsou uvedena v této diplomové práci, byla měřena na 4 různých přístrojích. Jsou to NanoTest™ NTX, Charpyho kádívko, trhací stroj pro zkoušku tahem a mikroindentory pro zkoušky tvrdosti.

2.1.1. NanoTest™ NTX

Mechanické vlastnosti materiálu byly měřeny mezi jinými na měřícím systému NanoTest™ NTX, který je na obrázku 10. Na přístroji lze změřit tvrdost materiálu a zkoumat modul pružnosti. Systém se skládá z keramického kyvadla, které je zavěšeno na speciálním čepu. Ve vrchní části přístroje se nachází cívka, díky které můžeme měnit zatěžující sílu. Vedle cívky je umístěn permanentní magnet. Cívka se přitahuje k magnetu, jak ji prochází proud. Vzniklá síla se přenese z kyvadla na indentor, který se vtlačuje do vzorku. Velice přesnou změnu polohy snímá kapacitní snímač.^[16]

Měření tvrdosti na měřícím systému NanoTest™ NTX vyžaduje přísné laboratorní podmínky. Celý přístroj je umístěn na antivibračním stole a je zakrytý ochranným krytem. Uvnitř se nachází soustava upravující teplotu a vlhkost. Vakuum NanoTest™ NTX nevyžaduje. Řízení, kontrolu a sběr dat zajišťuje počítač se speciálním softwarem.^[16]

Pomocí systému NanoTest™ NTX lze provádět různé testy mechanických vlastností. Kromě výše zmíněné indentace lze zkoumat i tribologické vlastnosti tenkých vrstev, realizovat vrypové zkoušky (scratch tests), testy opotřebení, topografické testy a v neposlední řadě využívat pin on disc metodu nebo zkoumat akustické emise.^[18]



Obr. č. 10: Schéma zařízení NanoTest™ 600. Převzato z: [16]

2.1.2. Mikroindentor

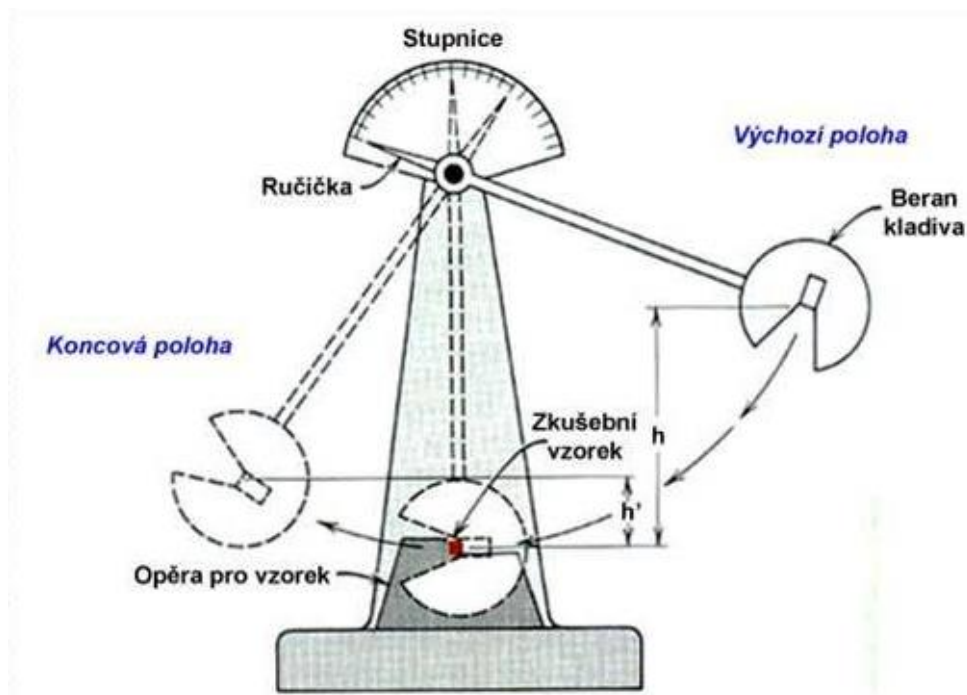
Tvrdoti podle Brinella a podle Vickerse se měřily ve firmě Enviform, a.s. na zkušebním stroji EMCO test automatic M4U-025 s laboratorním označením 9299-7-20. Na obrázku č. 11 je fotografie uvedeného stroje.



Obr. č. 11: Fotografie stroje EMCO test automatic M4U-025 – převzato z [27].

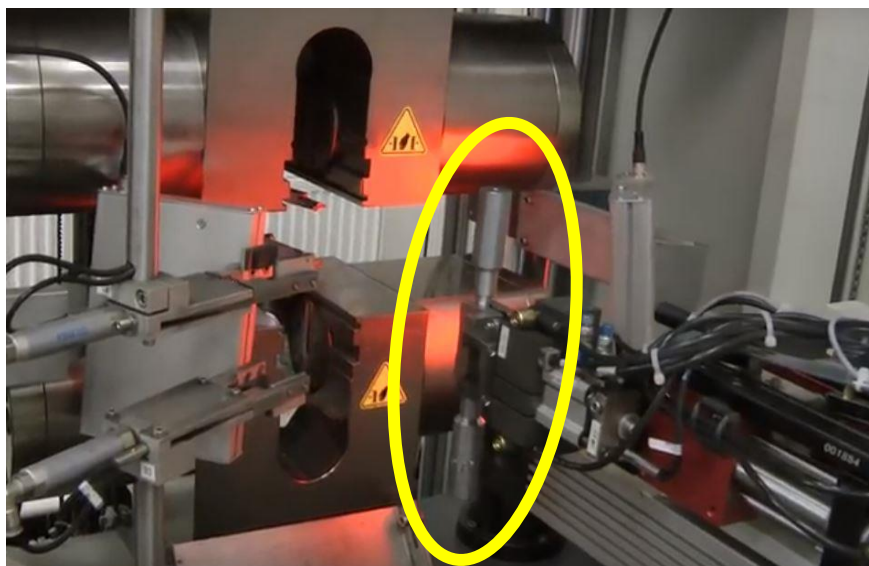
2.1.3. Charpyho kladívko

Princip zkoušky rázem v ohybu, ke které je Charpyho stroj/kladívko potřeba je podrobněji popsán v teoretické části diplomové práce. Data z nárazové zkoušky ohybem se měřily ve firmě Enviform, a.s. na zkušebním stroji Roell Amsler RKP 450 s laboratorním označením 9299-7-21. Na obrázku č. 12 je zobrazeno schéma Charpyho stroje/kladívka. V horní části stroje se nachází stupnice, na které ručička ukazuje energii spotřebovanou nárazem. Výchozí poloha Charpyho kladívka je v pravé horní části. Zkušební vzorek se umísťuje do spodní části stroje na vyznačené místo s opěrou. Po nárazu do vzorku je kladívko vymrštěno do koncové polohy. Nyní je stroj připraven na další zkoušku. Samotný stroj není umístěn ve vakuu ani k němu nelze přidat kryokomoru. Pokud provádíme zkoušku za snížené teploty, vzorek se umístí do chladicí kapaliny a již zchlazený vzorek se umísťuje do opěry ve spodní části Charpyho stroje.



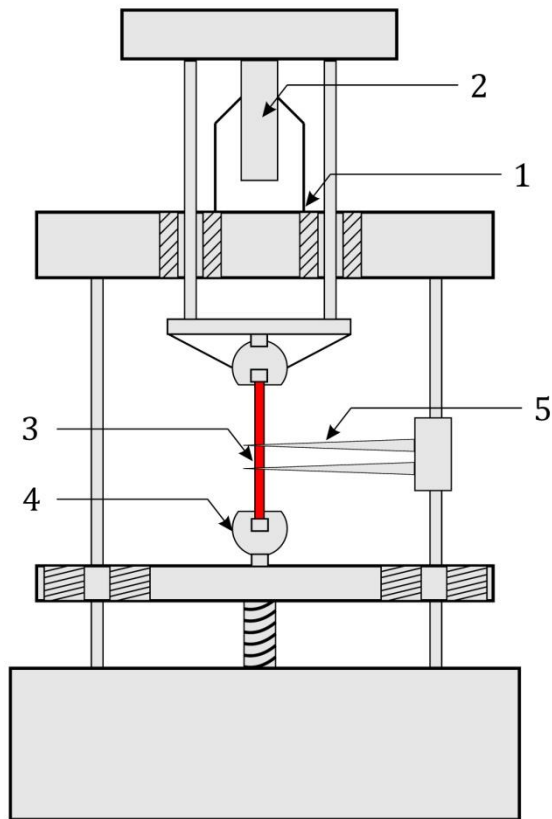
Obrázek č. 12: Schéma Charpyho kladívka – převzato z [5].

2.1.4. Trhací stroj



Obrázek č. 13: Fotografie automatizovaného trhacího stroje. Žlutě je označeno podávání vzorku. Převzato z [11].

Data získána pro tuto práci jsou z automatizovaného trhacího stroje, který je uveden na obrázku č. 13. Nachází se ve firmě Enviform, a.s. Na obrázku č. 14 je zobrazeno zjednodušené schéma trhacího stroje, které principiálně popisuje zkušební zařízení. Vzorek (3) se umísťuje do upínacích hlav (4). Z boku je umístěn snímač prodloužení (5). V horní části stroje se nachází hydraulické zařízení – válec (1) a píst (2), které zajišťuje sílu. Automatizovaný trhací stroj navíc obsahuje podávач vzorků, který po ukončení jedné zkoušky umístí do podávacích hlav nový vzorek. Upínací hlavy jsou pohyblivé, takže po zkoušce je vzorek odhozen a do hlav je umístěn vzorek nový.



Obrázek č. 14: Schéma trhacího stroje.

2.2. Popis vzorků

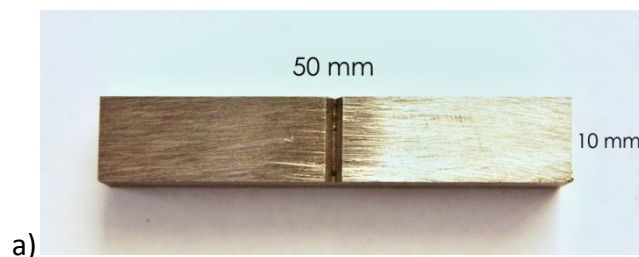
Vzorky, které byly v diplomové práci zkoumány, jsou přehledně popsány v tabulce č. 1. Zároveň je zde zaznačeno, které materiály byly jak zkoušeny. Čísla vzorků jsou řazeny vzestupně podle jejich obsahu C. Obsah uhlíku byl stanoven v akreditované chemické laboratoři společnosti Enviform, a.s. v Třinci. Obsah uhlíku se pohyboval od 0,19 do 0,531 hm. %.

Tabulka č. 1: Popis a označení vzorků.

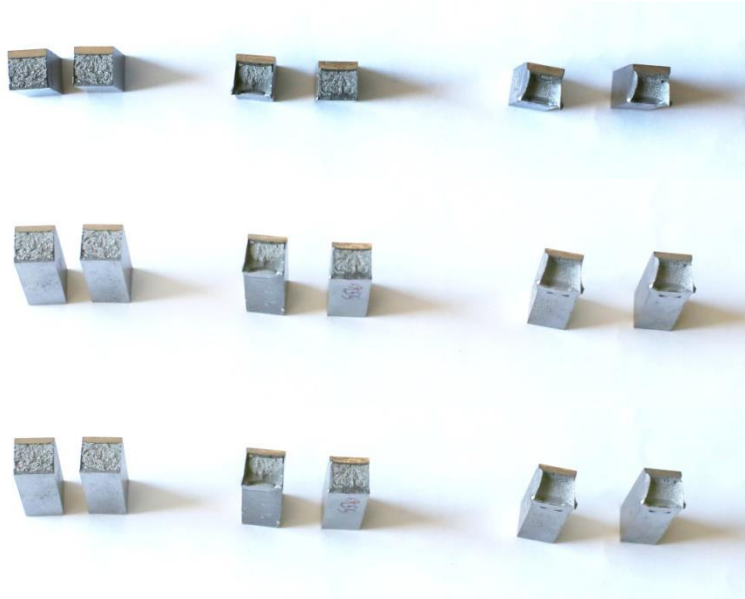
Číslo vzorku	Třída oceli	Druh oceli	Hm. % C	zkouška tvrdosti (nanoindentace)	zkouška tvrdosti (mikroindentace)	zkouška rázem v ohybu	určení smykového lomu	zkouška tahem
1	11	S355J2	0,190	.	.	.		.
2	11	S355J2	0,214	.	.	.	.	.
3	15	31CrMoV9	0,318	.	.	.		.
4	12	C35R	0,378	.	.	.		.
5	12	C35R	0,389	.	.	.		.
6	12	C35R	0,389	.	.	.		.
7	12	C35R	0,389	.	.	.		.
8	12	C35E	0,390	.	.	.	.	.
9	15	42CrMo4	0,411	.	.	.		.
10	15	42CrMoS4	0,413	.	.	.		.
11	12	C45R	0,470	.	.	.	.	.
12	12	C45R	0,476	.	.	.	.	.
13	12	C45E	0,480	.	.	.	.	.
14	12	C45R	0,482	.	.	.	.	.
15	12	C45R	0,490	.	.	.	.	.
16	15	51CrV4	0,531	.	.	.	.	.

- **51CrV4** – jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom – vanadovou ocel určenou k zušlechťování. Jelikož jde o ocel s vysokou prokalitelností, lze ji využít k tvorbě vysoce namáhaných strojních dílů. V zušlechtěném stavu má velmi příznivý poměr pevnosti k mezi kluzu. Na rozdíl od Cr-Mo ocelím má ale nižší houževnatost. Díky své vysoké hodnotě meze únavy při střídavém namáhání je vhodná k tvorbě zušlechtěných pružin. Kalení probíhá do oleje nebo do roztoků syntetických polymerů. Obsah uhlíku je v rozmezí 0,47 – 0,55 hmotnostních %.
- **42CrMo4 (42CrMoS4)** – jedná se o nízkolegovanou ušlechtilou chrom – molybdenovou ocel určenou k zušlechťování. Opět jde o ocel s vyšší prokalitelností, kterou lze využít při výrobě namáhaných strojních dílů. Není náchylná k popouštěcí křehkosti. Kalení probíhá do méně razantního kalicího prostředí, jelikož je náchylná ke vzniku kalicích trhlin v místech s vrubovým účinkem nebo povrchových vad. V kaleném stavu dobře odolává opotřebení. Patří k jedné z nejčastěji používaných oceli k zušlechťování. Obsah uhlíku je v intervalu 0,38 – 0,45 hmotnostních %.

- **C35E (C35R)** – jde o nelegovanou ušlechtilou ocel určenou k zušlechťování. Využívá se k výrobě méně namáhaných strojních dílů, které nemusí být při zušlechťování prokaleny v celém průřezu. Obsah uhlíku je v rozmezí 0,32 – 0,39 hmotnostních %.
- **C45E (C45R)** – jedná se o nelegovanou ušlechtilou ocel určenou k zušlechťování. Stejně jako C35E (C35R) se využívá k výrobě méně namáhaných strojních dílů ve stavu zušlechtěném nebo normalizačně žíhaném. Pokud materiál využíváme pro výrobu tvarově složitějších dílů, upřednostňuje se kalení do oleje, které zamezí vzniku trhlin. Obsah uhlíku je v intervalu 0,42 – 0,50 hmotnostních %.
- **S355J2** – jedná se o nelegovanou jakostní konstrukční ocel s obsahem uhlíku v rozmezí 0,2 – 0,22 hmotnostních %.
- **31CrMoV9** – jde o středně legovanou ušlechtilou chrom – molybden – vanadovou ocel určenou k nitridování. Využívá se při konstrukci strojních dílů, které jsou určeny k nitridaci. Vysoká prokalitelnost dovoluje ocel použít i pro rozměrnější strojní díly. Nitridovaná vrstva má větší hodnotu tvrdosti a je odolná proti opotřebení a korozi v méně agresivních prostředích. Pomocí nitridace se zvyšuje mez únavy povrchové vrstvy při střídavém namáhání. Tuto ocel můžeme použít i jako ocel k zušlechťování bez následující nitridace. Obsah uhlíku v oceli je v rozmezí 0,27 – 0,34 hmotnostních %.

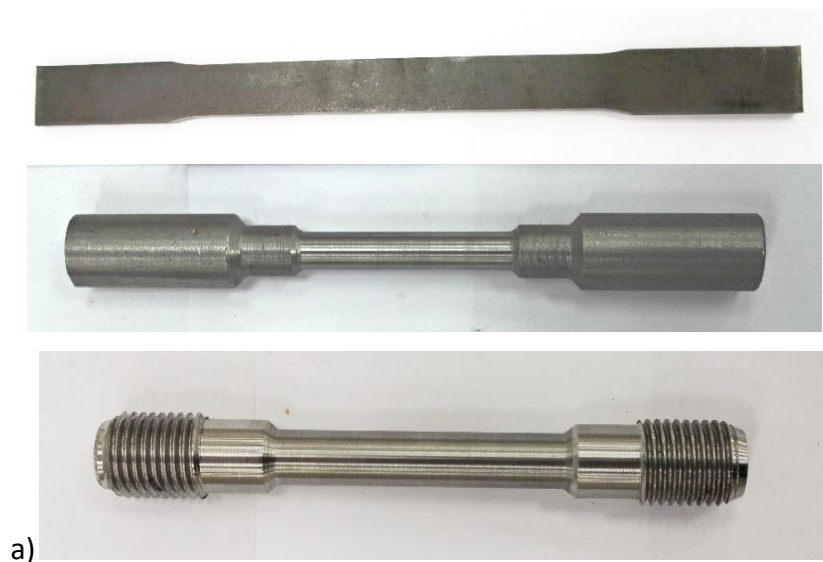


Obrázek č. 15: Vzorky pro zkoušku rázem v ohybu, a) před zkouškou, b) po zkoušce.



Obrázek č. 16: Vzorky pro zkoušku rázem v ohybu, a) před zkouškou, b) po zkoušce.

Na obrázcích 15 a) a 15 b) jsou fotografie vzorků použitých při zkoušce rázem v ohybu. Byl použit vrub ve tvaru písmene V. Na obrázku 16 jsou použité vzorky při zkoušce rázem v ohybu. Na obrázcích 17 a), b) jsou fotografie vzorků použitých při zkoušce tahem.





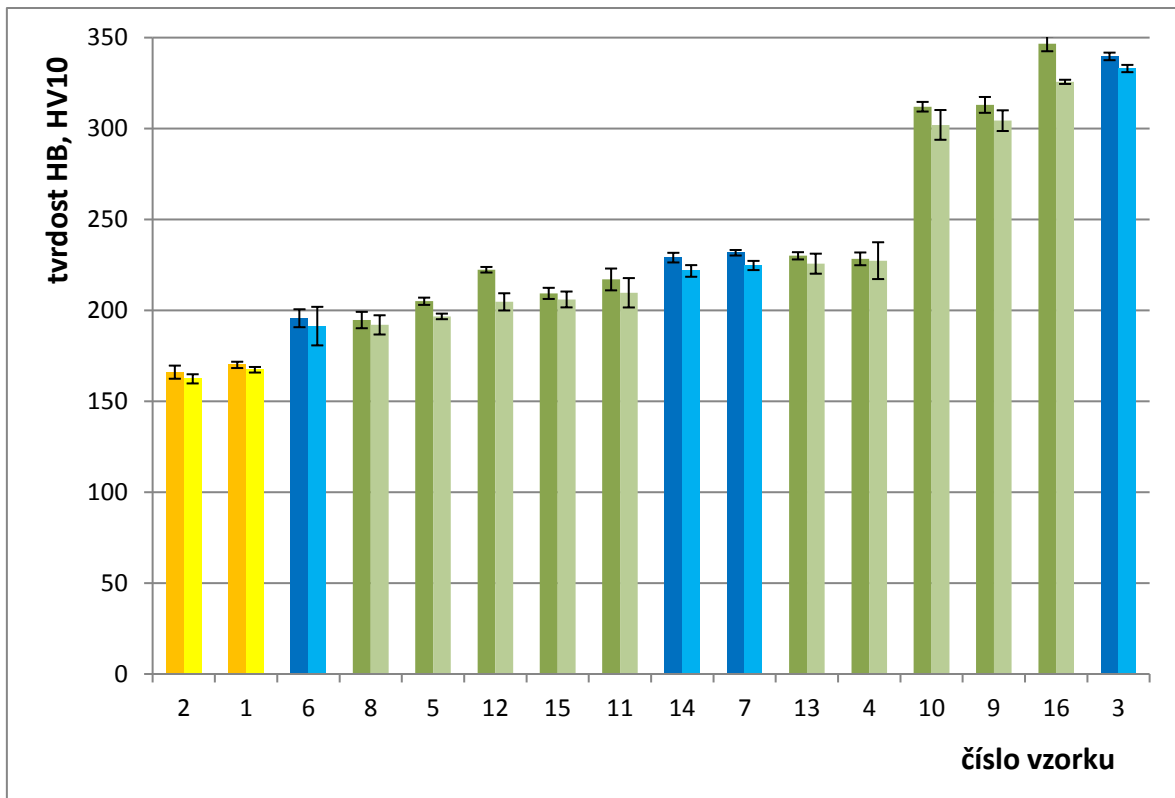
b)

Obrázek č. 17: a) Vzorky pro zkoušku tahem před zkouškou – náhodný výběr, b) po zkoušce – náhodný výběr.

2.3. Analýza získaných dat

2.3.1. Zkoušky tvrdosti na mikroindentoru

Obrázek č. 18 ukazuje výsledky zkoušek tvrdosti na mikroindentoru podle Vickerse (HV10) a podle Brinella (HB). Vzorky byly ve tvaru tyčinek, které se používají pro zkoušku rázem v ohybu. Šlo tedy o vzorky z objemového materiálu. Abychom docílili přesnějšího určení materiálových charakteristik jednoho druhu materiálu, na obě zkoušky se používala tatáž tyčinka. Prvně byl vzorek podroben zkoušce rázem v ohybu a následně zkoušce tvrdosti. Vzorky jsou seřazeny vzestupně podle naměřených hodnot tvrdosti včetně jejich odchylek. Z grafu je zřetelně vidět jistá korelace. Vzorky z třídy oceli 11 jsou nejméně tvrdé, z třídy 12 jsou tvrdší a nejvíce tvrdé vzorky jsou ze třídy oceli 15.



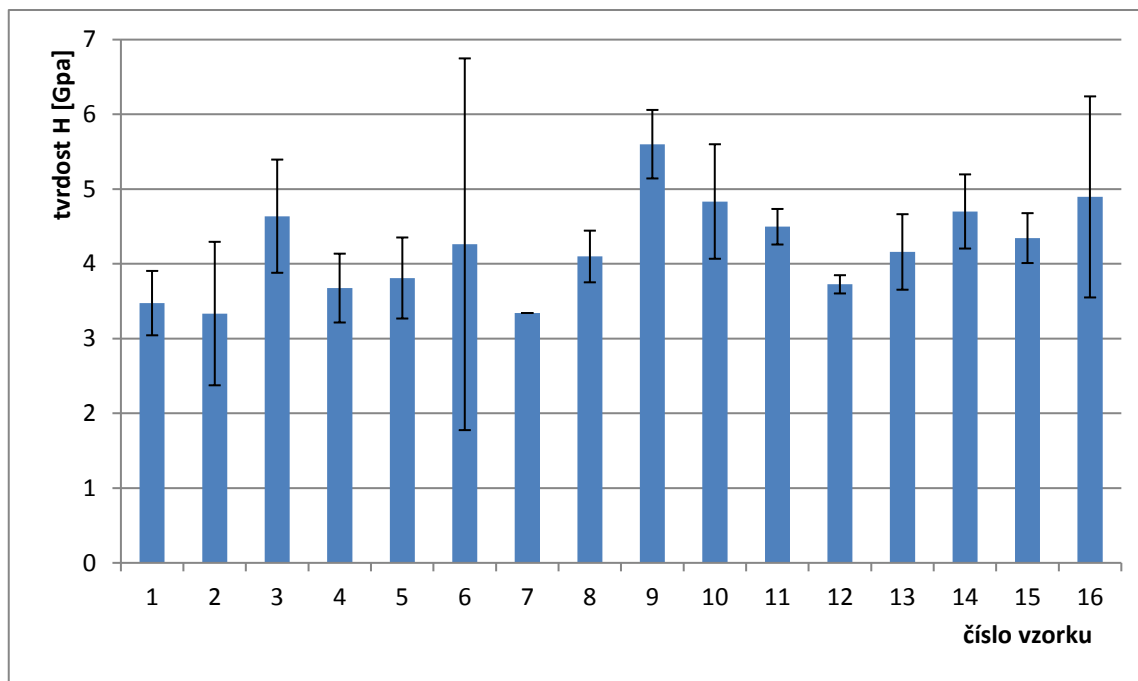
Obr. č. 18: Porovnání tvrdosti oceli podle Vickerse a Brinella vzhledem k třídě oceli.

Barevné odlišení podle třídy oceli: 15 – modrá, 11 – žlutá, 12 – zelená.

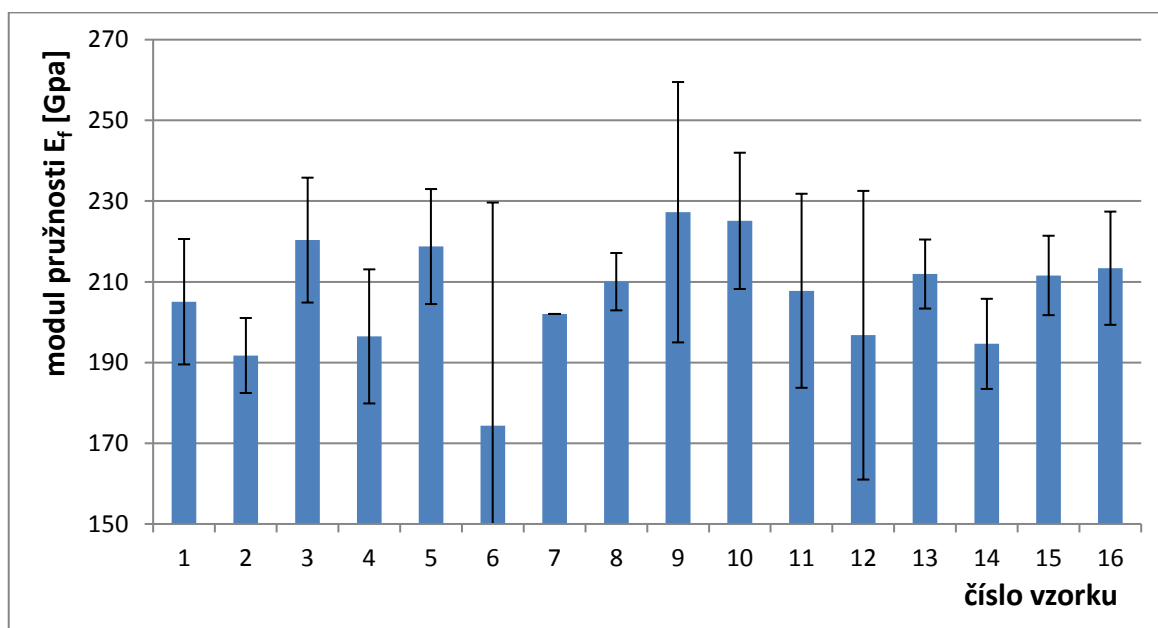
Jak vidíme z obrázku č. 18, zkoušky tvrdosti podle Brinella (druhé sloupce) i Vickerse (první sloupce) vykazovaly stejnou tendenci. Čím větší hodnota tvrdosti podle Brinella HB, tím větší hodnota tvrdosti podle Vickerse HV10. Z grafu je patrné, že množství uhlíku v oceli není zárukou větší tvrdosti.

2.3.2. Zkoušky tvrdosti na nanoindentoru

Níže na obrázcích 19 a 20 jsou zobrazeny data včetně jejich odchylek získaná z měření na nanoindentoru NanoTest™. Měřila se tvrdost H a redukovaný modul pružnosti E_f , které se později porovnávaly s modulem pružnosti, vypočítaným z dat získaných tahovou zkouškou.



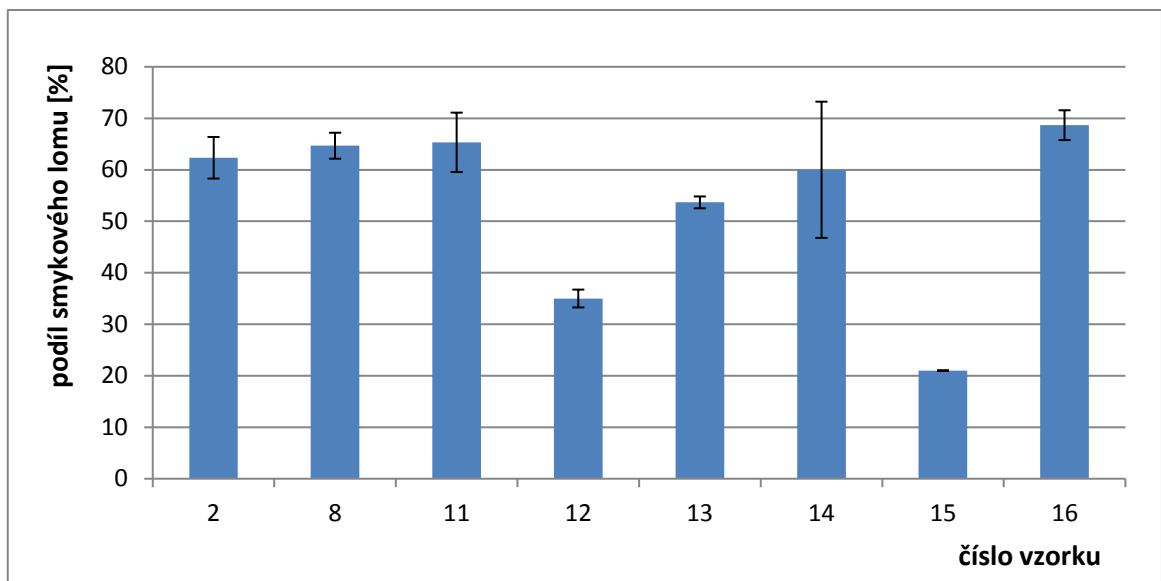
Obr. č. 19: Tvrdost H_{IT} měřená na nanoindentoru.



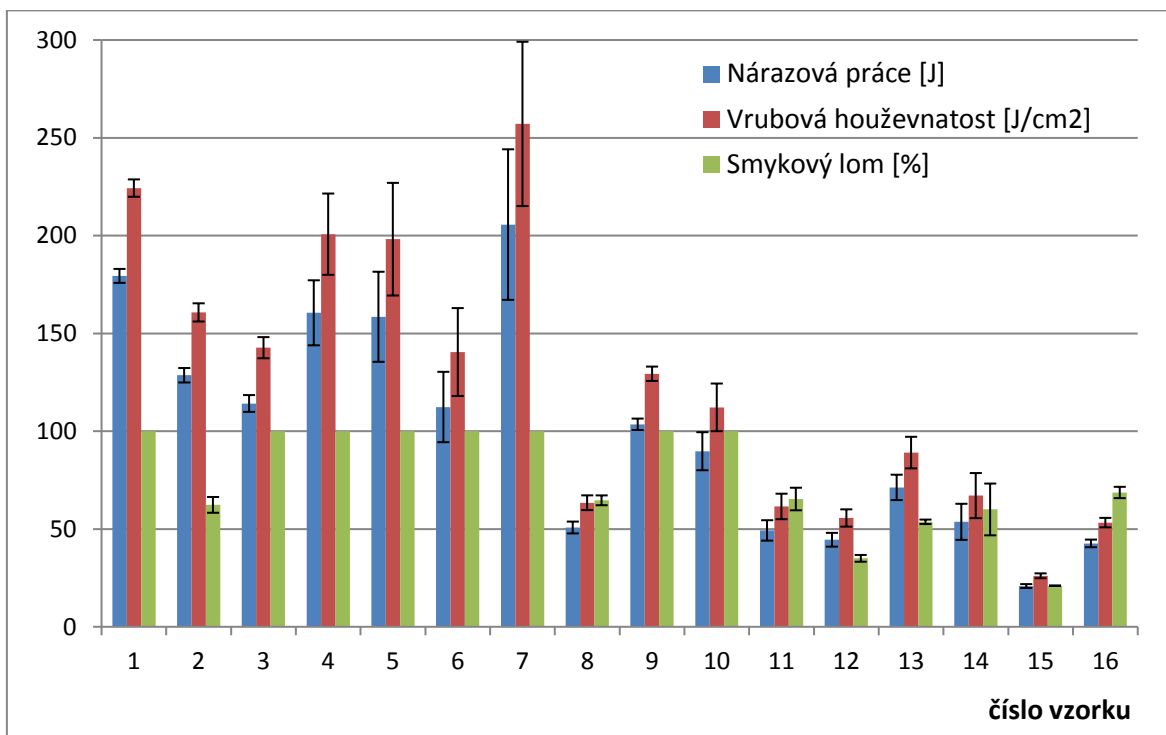
Obr. č. 20: Modul pružnosti E_f měřený na nanoindentoru.

2.3.3. Zkoušky rázem v ohybu

Následují výsledky zkoušek na Charpyho kladívku – nárazová práce, vrubová houževnatost (obrázek č. 22) a podíl křehkého a houževnatého lomu (= procenta smykového lomu) – obrázek č. 21. Podíl smykového lomu se měřil pouze na více houževnatých materiálech. Křehké vzorky vůbec smykový lom nezaznamenaly.



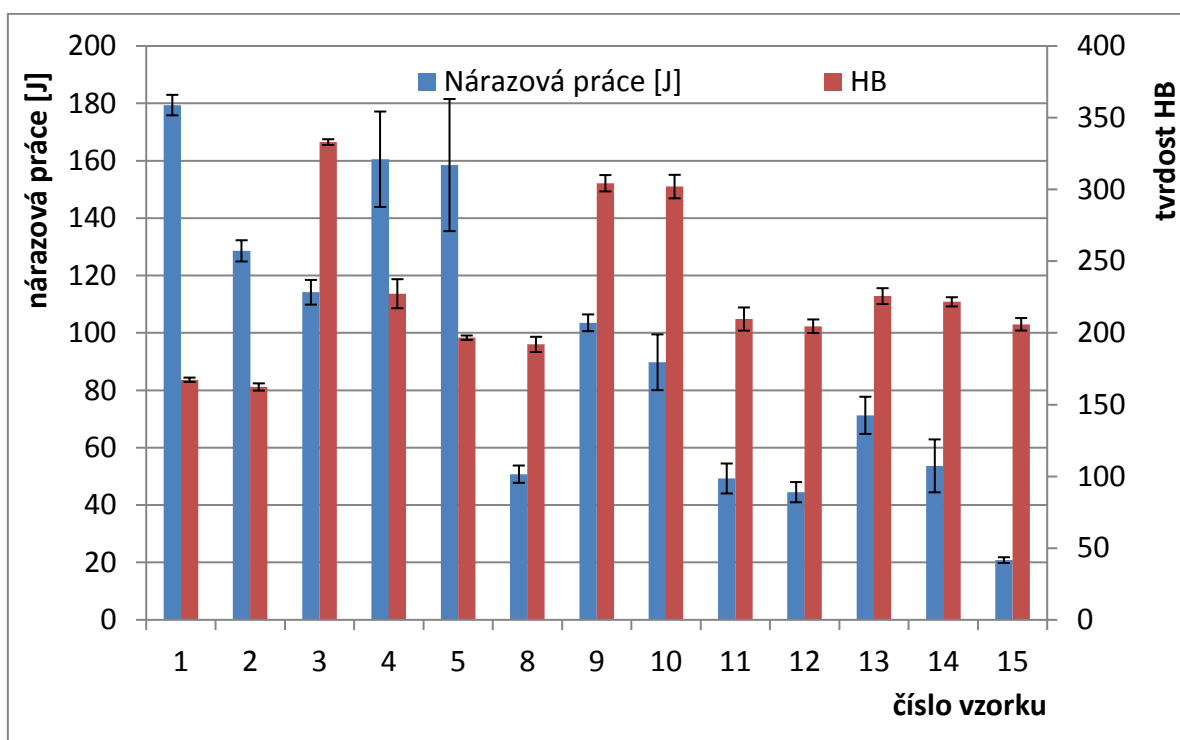
Obr. č. 21: Procenta smykového lomu = podíl křehkého a houževnatého lomu.



Obr. č. 22: Porovnání zkoušek rázem v ohybu – nárazové práce a vrubové houževnatosti spolu s % smykového lomu.

Hodnoty jsou seřazeny klasicky podle čísla vzorku, tedy vzestupně podle obsahu C v oceli. Jak jsme očekávali, nárazová práce a vrubová houževnatost spolu úzce souvisí, mají stejnou rostoucí tendenci. Smykový lom se dal měřit pouze u vzorků, které měly zřetelnou houževnatou část lomu. Vzorky, které nebyly měřeny, měly hodnotu smykového lomu 100%. Z grafu vidíme jistou korelaci mezi nárazovou prací, vrubovou

houževnatostí a obsahem C v oceli. Čím více uhlíku je v oceli obsaženo, tím méně nárazové práce je potřeba k přetržení vzorku na 2 části a tím méně je vzorek houževnatý.

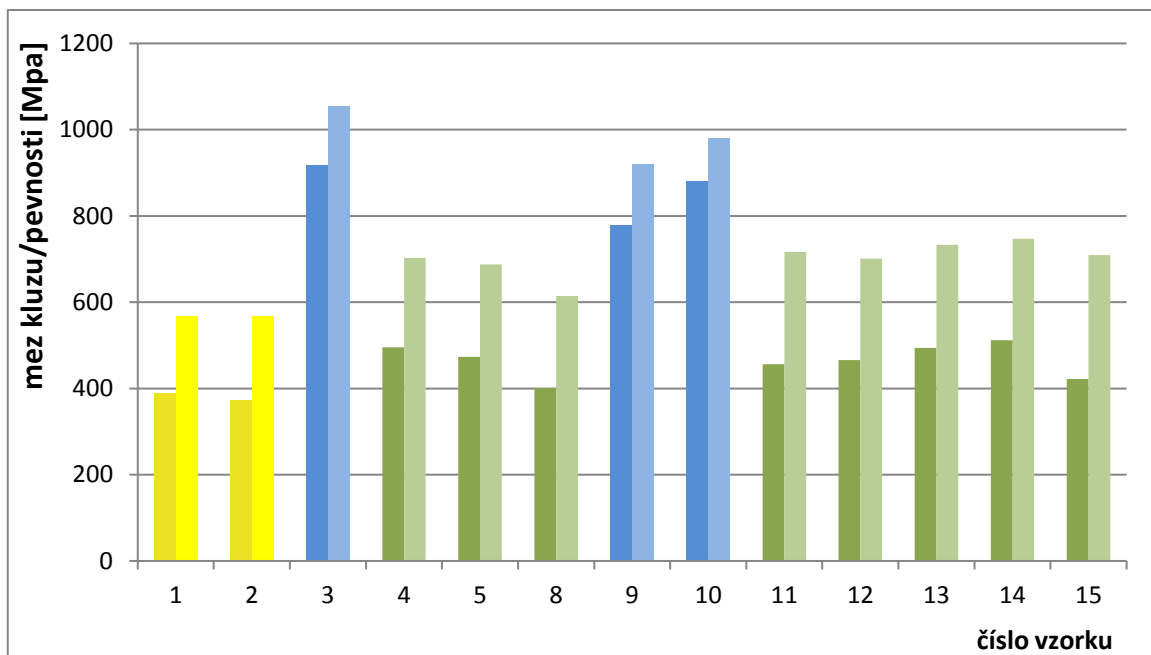


Obr. č. 23: Porovnání tvrdosti a nárazové práce.

2.3.4. Zkouška tahem

Tahovou zkouškou neprošly všechny vzorky, u kterých se měřila tvrdost. Jelikož se měření provádělo v externí firmě s akreditovanou laboratoří, ne vždy bylo možné z dodaného materiálu vytvořit vzorky pro všechny zkoušky. Prováděly se pouze takové zkoušky, které byly vyžadovány.

Při vyhodnocování modulu pružnosti z tahové zkoušky byly použity data z lineární části tahového diagramu, konkrétně v pořadí data 200 – 800.



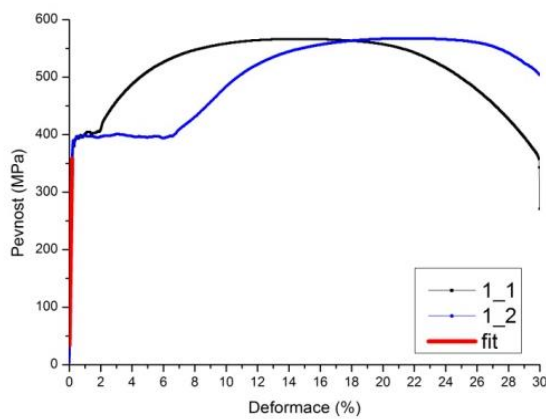
Obr. č. 24: První sloupec – mez kluzu, druhý sloupec – mez pevnosti. Barevné odlišení podle třídy oceli: 15 – modrá, 11 – žlutá, 12 – zelená.

Na obrázku č. 24 jsou zobrazeny výsledky tahové zkoušky. V prvním sloupci jsou naměřené hodnoty meze kluzu a v druhém sloupci meze pevnosti. Vzorky jsou odlišené barevně podle jejich zařazení do tříd oceli. Modře jsou vybarveny vzorky patřící do třídy 15, žlutě do třídy 11 a zelené do třídy 12. Vzorky jsou řazeny vzestupně podle obsahu uhlíku C v oceli. Graf potvrzuje teoretickou znalost, kdy se stoupající mezí kluzu stoupá i mez pevnosti.

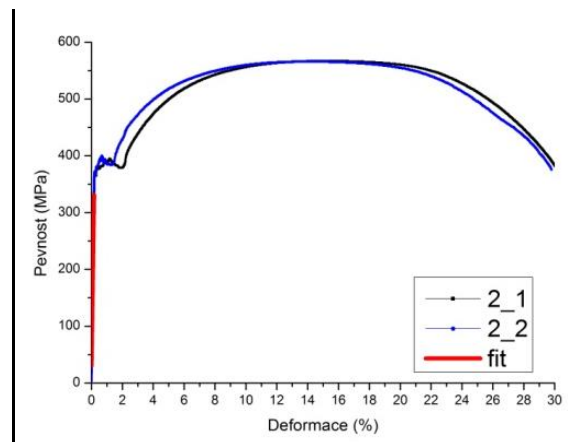
Velice důležitou materiálovou charakteristikou je modul pružnosti E , který byl vypočítán jako směrnice nabitované přímky v lineární části tahového diagramu. Samotné tahové diagramy jsou zobrazeny na obrázcích 25 a) – k). Výsledné moduly pružnosti jsou uvedeny v tabulce č. 2. Každý tahový diagram obsahuje 2 přímky, jelikož z každého materiálu byly vytvořeny 2 vzorky a proběhly 2 nezávislé zkoušky.

Tab. č. 2: Vypočítané hodnoty modulu pružnosti na trhacím stroji pomocí tahové zkoušky.

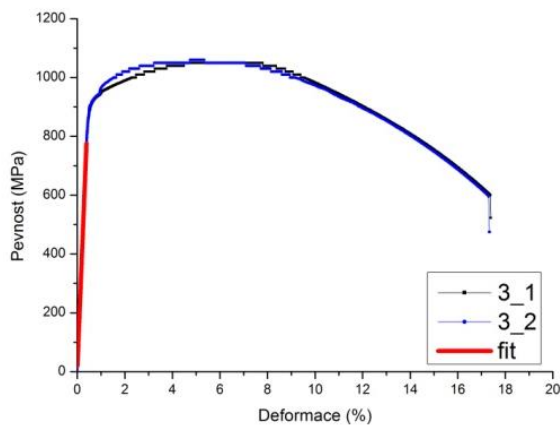
číslo vzorku	E [GPa]	odchylka [GPa]
1	184,2	4,4
2	188,0	4,9
3	199,3	1,0
4	189,9	3,0
5	209,1	0,7
9	206,7	2,1
10	196,2	1,8
11	234,1	14,9
12	182,5	2,7
13	191,3	2,8
14	281,5	2,2



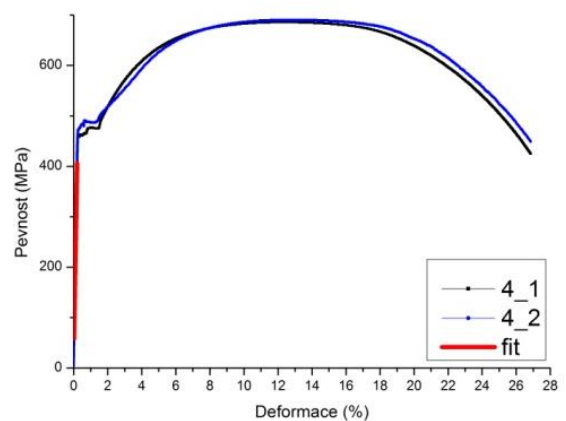
Obr. č. 25 a): Tahový diagram vzorku č. 1



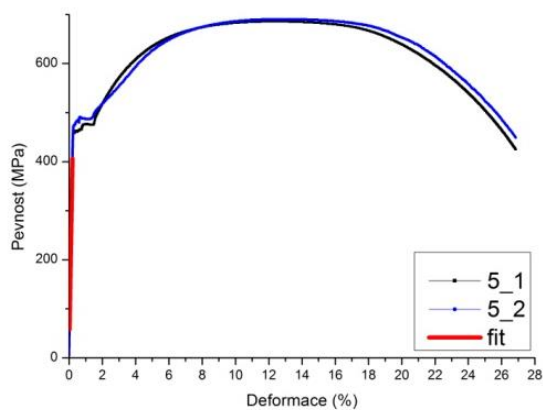
Obr. č. 25 b): Tahový diagram vzorku č. 2.



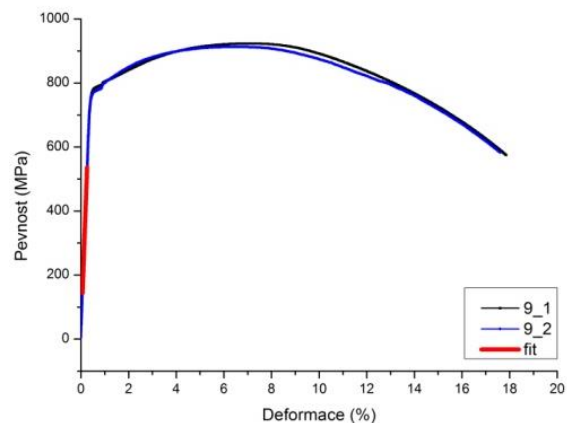
Obr. č. 25 c): Tahový diagram vzorku č. 3.



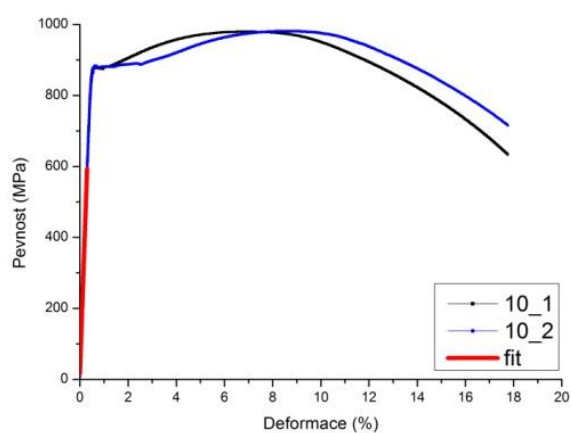
Obr. č. 25 d): Tahový diagram vzorku č. 4.



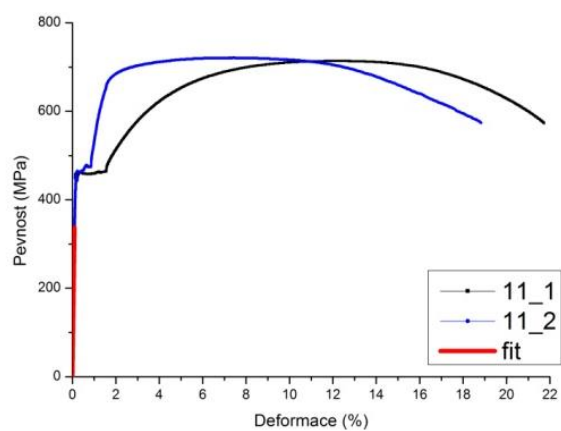
Obr. č. 25 e): Tahový diagram vzorku č. 5.



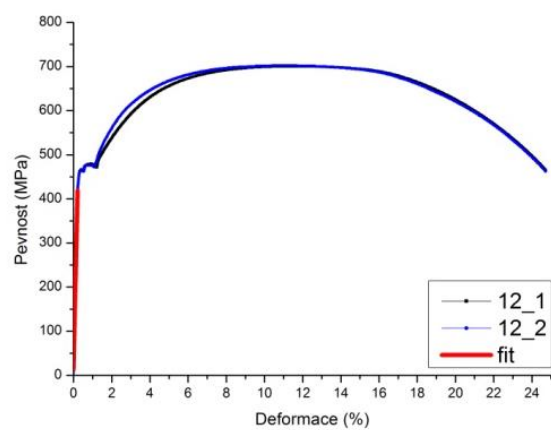
Obr. č. 25 f): Tahový diagram vzorku č. 9



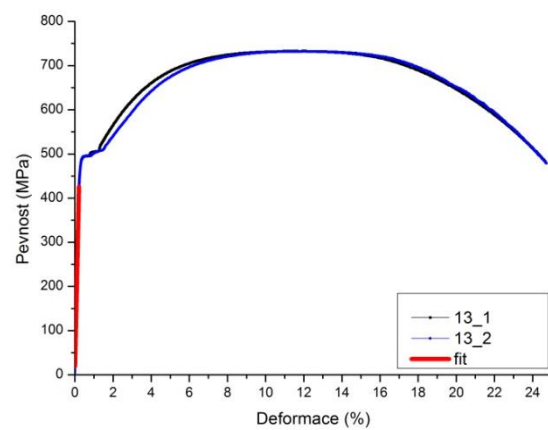
Obr. č. 25 g): Tahový diagram vzorku č. 10.



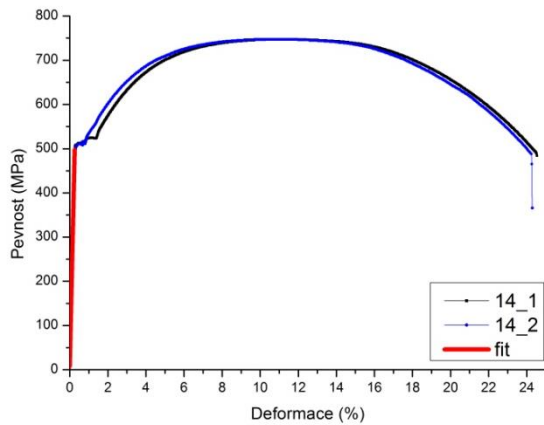
Obr. č. 25 h): Tahový diagram vzorku č. 11.



Obr. č. 25 i): Tahový diagram vzorku č. 12.



Obr. č. 25 j): Tahový diagram vzorku č. 13.

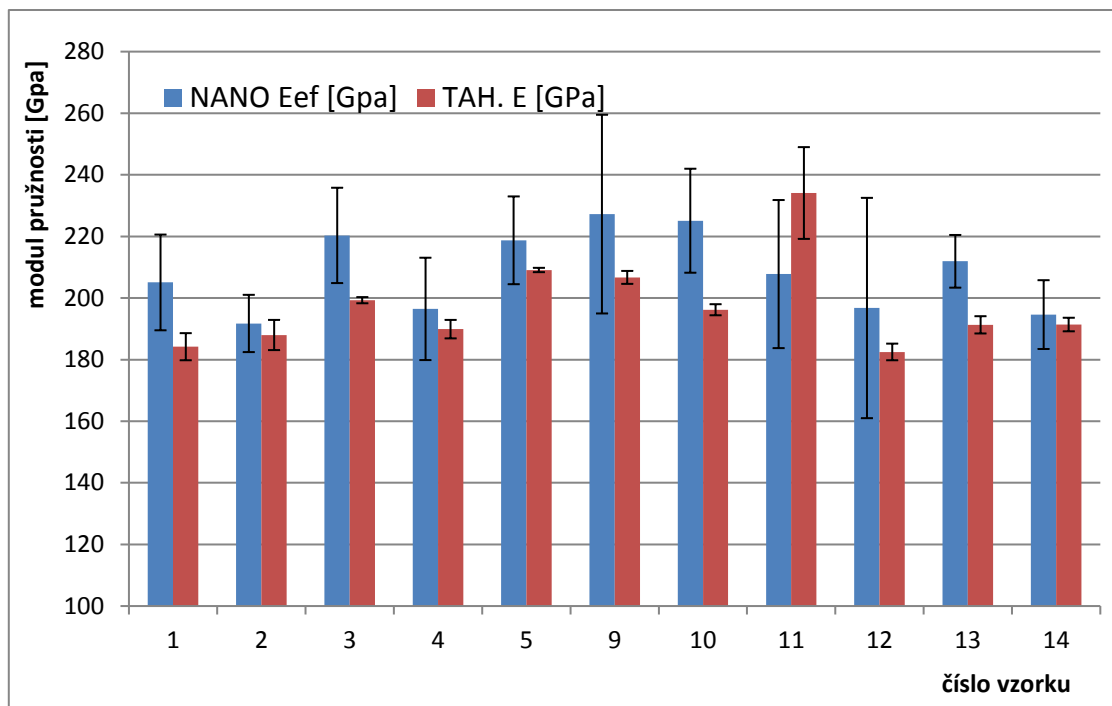


Obr. č. 25 k): Tahový diagram vzorku č. 14.

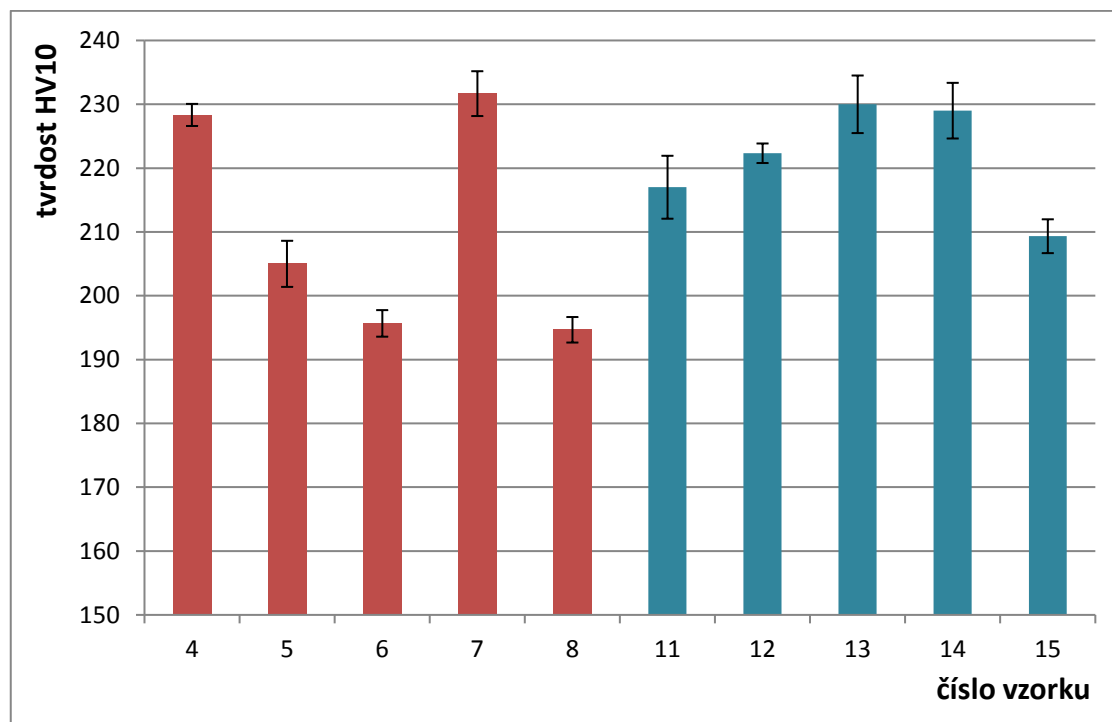
2.3.5. Studium vzájemných korelací

V této podkapitole jsou vyšetřovány vztahy mezi makroskopickými a mikroskopickými mechanickými charakteristikami zkoumaných materiálů. Data jsou srovnávána z různých pohledů, ať už z hlediska složení, mechanických vlastností nebo způsoby přípravy vzorku.

Na obrázku č. 36 jsou zobrazeny moduly pružnosti. Modrou barvou je zobrazen modul pružnosti naměřený na nanoindentoru. Červeně jsou moduly pružnosti z trhacího stroje získané pomocí zkoušky tahem. Je obecně známo, že ocel má hodnotu modulu pružnosti kolem 200 GPa, což odpovídá ve všech případech. V grafu se porovnává Youngův modul pružnosti TAH. E , a redukovaný modul pružnosti NANO E_{ef} z nanoindentace. Abychom dostali klasický Youngův modul pružnosti i z nanoindentace, museli bychom jej vynásobit Poissonovým číslem.



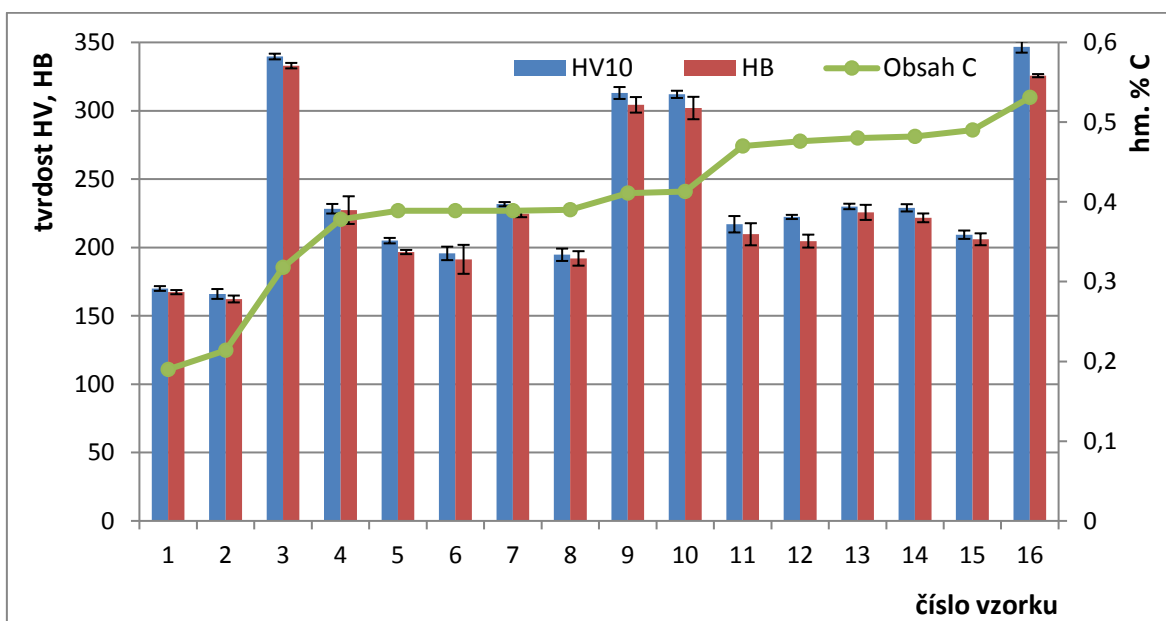
Obr. č. 26: Modul pružnosti měřený na nanoindentoru a vypočítaný z tahové zkoušky.
Barevné rozlišení: modrá – nanoindentor, červená – tahová zkouška.



Obr. č. 27: Porovnání tvrdosti podle Vickerse s druhy oceli C35 (červená) a C45 (modrá), které se výrazně liší obsahem uhlíku.

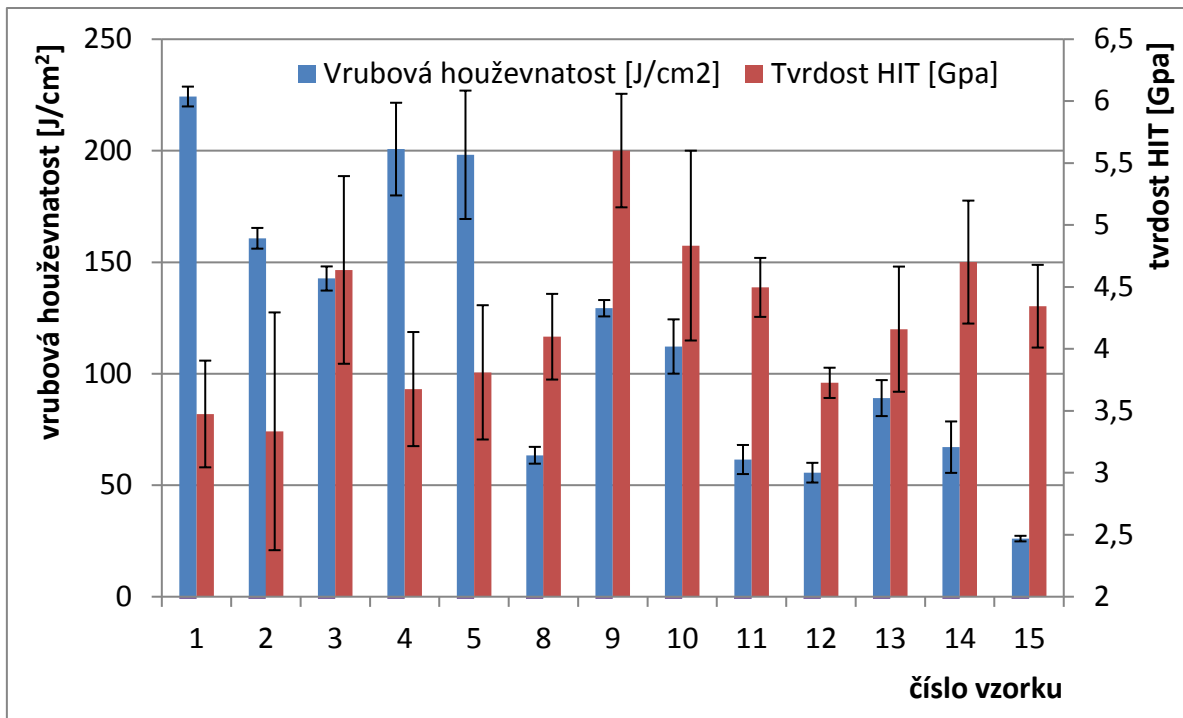
Na obrázku č. 27 je zobrazen graf znázorňující naměřenou tvrdost podle Vickerse barevně rozlišenou podle druhu oceli C35 a C45. Modře jsou zobrazeny vzorky z oceli s označením C45, červeně je ocel C35. Jak je popsáno výše, ocel C45 má větší obsah uhlíku než ocel C35. Ocel C45 by tedy měla být daleko tvrdší než ocel C35. Tento fakt byl potvrzen jenom částečně. I kdybychom brali v úvahu tu nejvyšší možnou nejistotu měření, tak stále máme hodně vzorků, které mají podobnou tvrdost. Nicméně pokud bychom si odmysleli vzorky 4 a 7, daná závislost by byla potvrzena.

Na obrázku č. 28 se srovnává tvrdost podle Vickerse, Brinella s obsahem uhlíku C v materiálu vzorku. Kromě vzorku 4 a 8 by se dalo tvrdit, že existuje určitá souvislost s obsahem uhlíku v materiálu a jeho tvrdostí.

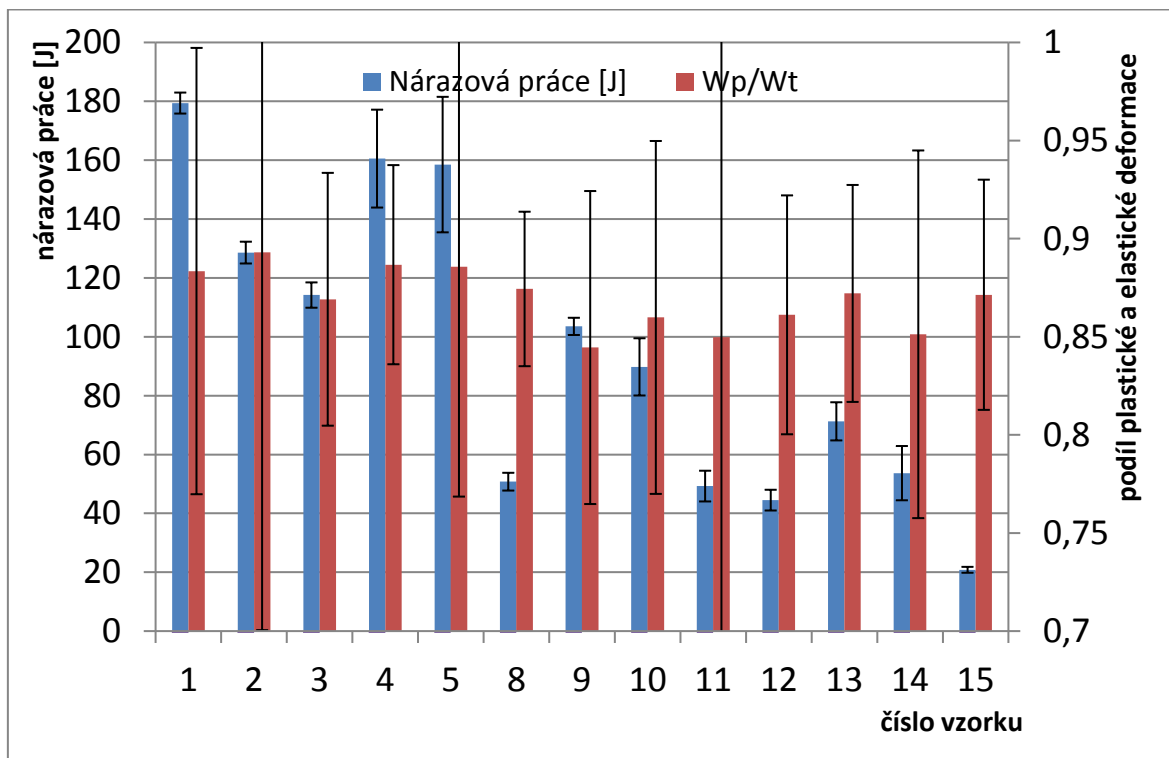


Obr. č. 28: Porovnání tvrdosti oceli podle Vickerse a Brinella vzhledem k obsahu uhlíku pro třídu oceli č. 12.

Na obrázku č. 29 vidíme korelaci vrubové houževnatosti a tvrdosti H_{IT} . Z grafu je zřejmé, že s klesající vrubovou houževnatostí roste tvrdost H_{IT} a naopak. Na obrázku č. 30 lze vidět korelaci nárazové práce a podílu plastické a elastické práce, který byl měřen na nanoindentoru. Z grafu je patrné, v daném případě žádnou korelaci nenalezneme.



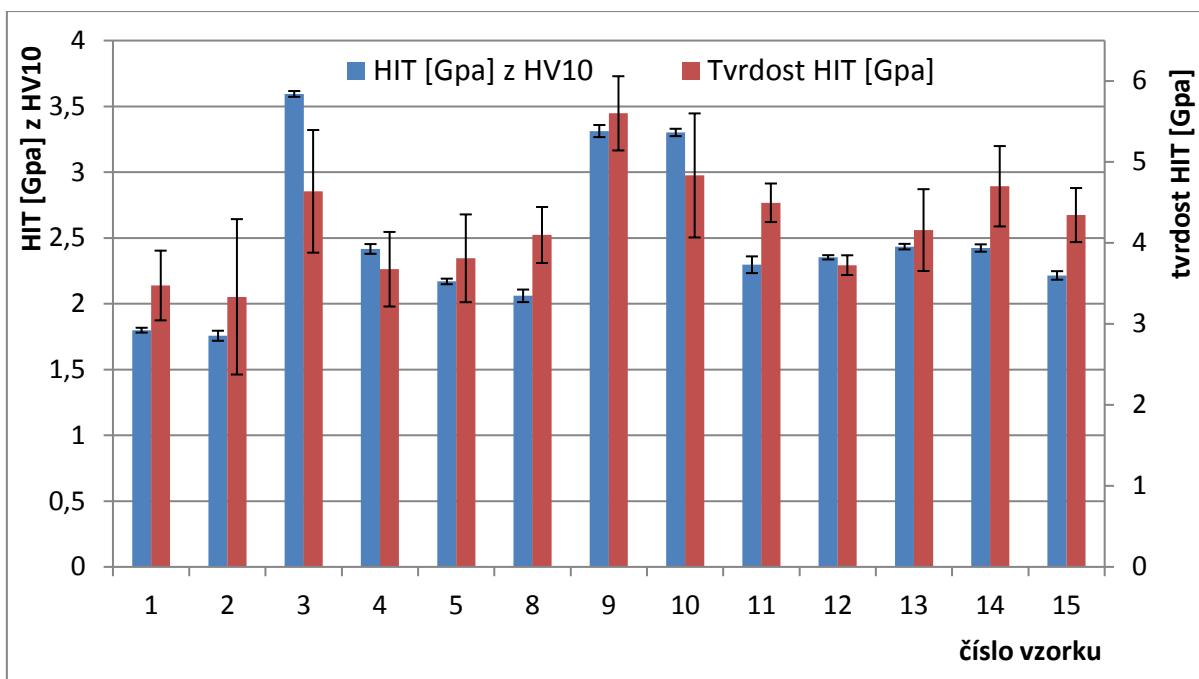
Obr. č. 29: Porovnání vrubové houževnatosti a tvrdosti.



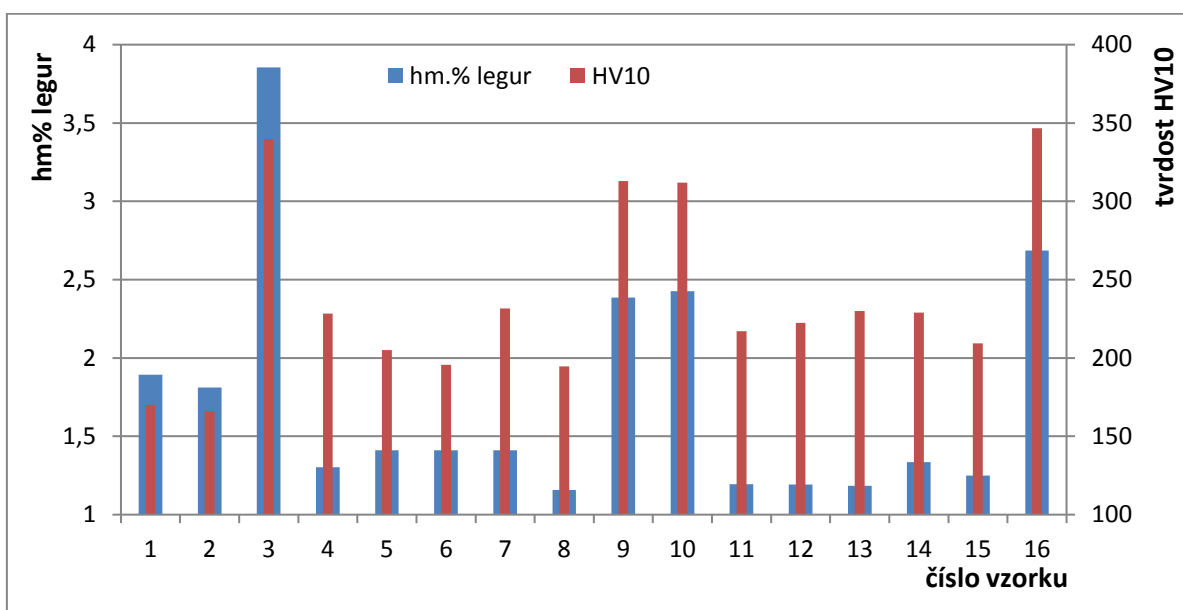
Obr. č. 30: Porovnání nárazové práce s podílem plastické a elastické práce.

Na obrázku č. 31 je zobrazena korelace tvrdosti HIT měřená na nanoindentoru s tvrdostí HIT vypočítanou pomocí vzorce (10) z dat naměřených na mikroindentoru, tedy

klasickou zkouškou tvrdosti. Zde můžeme vidět určitou tendenci. Na posledním obrázku č. 32 je zobrazena korelace tvrdosti podle Vickerse s hm. % legur (Mn, Si, Cu, Cr, Ni, Al, Mo, W, V, Co B Nb) ve vzorcích. Z grafu krásně vidíme, že čím více legur je ve vzorku, tím je materiál tvrdší. Výjimkou jsou vzorky 1 a 2, u kterých ale víme, že obsahují nejmenší množství uhlíku, což může být důvodem anomálie.



Obr. č. 31: Korelace tvrdosti H_{IT} z nanoindentoru a klasického tvrdoměru.



Obr. č. 32: Korelace tvrdosti a množství legur ve vzorcích.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo najít korelace mezi vrubovou houževnatostí a mikrotvrdostí. Všechny vzorky se řadily do kategorie objemových materiálů. Celkem se použily 4 druhy testování. Jednalo se o zkoušku rázem v ohybu metodou Charpy, zkoušku tahem na trhacím stroji, zkoušku tvrdosti na mikrotvrdoměru a nanoindentaci na nanoindentoru.

Srovnání mezi vzorky dopadlo různě. Některé předpokládané korelace byly potvrzeny, jiné nikoliv. Na mikrotvrdoměru se měřila tvrdost podle Vickerse a Brinella. Data nám jasně ukazují, že vzorky byly podobně tvrdé v rámci tříd ocelí. Nejtvrdší materiály byly ze třídy 15, méně tvrdé ze třídy 12 a nejméně tvrdé z třídy 11. Stejně tak se ukázalo, že hodnota Vickersovy tvrdosti je vždy větší než hodnota Brinellovy tvrdosti. Naopak se nepotvrdila korelace, že by tvrdost materiálu přímo závisela na hm. % C obsaženém ve vzorku. Co ale blízce souvisí s tvrdostí materiálu je celkové množství legur. Čím více legur je v materiálu, tím je materiál tvrdší.

Z nanoindentačního měření se získaly informace o velikosti redukovaného modulu pružnosti, tvrdosti a podílu plastického a elastického lomu. Měřením bylo zjištěno, že pokud měříme nanotvrdost na objemovém materiálu, měření má velkou odchylku, nemůžeme tedy určit žádnou úzkou souvislost mezi tvrdostí a obsahem uhlíku v materiálu. Stejně tak efektivní modul pružnosti nesouvisí přímo s obsahem uhlíku v materiálu.

Zkouškou rázem v ohybu se měřila nárazová práce, vrubová houževnatost a podíl smykového lomu. Z měření je patrné, že všechny 3 charakteristiky přímo souvisí s obsahem uhlíku ve vzorku. Čím více uhlíku je ve vzorcích, tím méně nárazové práce je potřeba a máme menší vrubovou houževnatost.

Z tahové zkoušky se získaly informace o mezích kluzů a mezích pevností. Z tahových diagramů jsme si vypočítali Youngův modul pružnosti. Z grafů vyplývá, že Youngův modul nesouvisí přímo s obsahem uhlíku, ale úzce souvisí s redukovaným modulem pružnosti z nanoindentace.

Závěrem lze říci, že vrubová houževnatost s mikrotvrdostí koreluje. Tento poznatek nám může pomoci při zkoumání materiálů menších rozměrů, neboť budeme tyto závislosti znát a vědět o vzorcích více.

Seznam použité literatury

- [1] Hi-tech ocel nabízí výrobcům nové možnosti [online]. Praha: Hospodářské Noviny, 2010 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <https://archiv.ihned.cz/c1-46437850-hi-tech-ocel-nabizi-vyrobcum-nove-moznosti>.
- [2] VIMALRAJ, Cyril, Paul KAH, Belinga MVOLA a Jukka MARTIKAINEN. Effect of nanomaterial addition using GMAW and GTAW processes. Reviews on advanced materials science. 2016, 44(4), 370-382.
- [3] MAHAPATRO, Anil. Bio-functional nano-coatings on metallic biomaterials. Materials Science and Engineering C. 2015, (55), 227-251.
- [4] SVOBODA, Luboš. Stavební hmoty [online]. 4. Praha, 2018 [cit. 2018-08-03]. ISBN 978-80-260-4972-2. Dostupné z: <http://people.fsv.cvut.cz/~svobodal/sh/SH4v1.pdf>.
- [5] FALTA, Jan. Instrumentace a vyhodnocování rázových zkoušek na plynovodní oceli. Praha, 2015. Bakalářská práce. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.
- [6] CHEMICKÉ PRVKY OCELÍ. TumliKOVO [online]. [cit. 2018-08-03]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/rubriky/materialy/chemicke-prvky-oceli/>.
- [7] VELES, Pavol. Mechanické vlastnosti a skúšanie kovov: celoštátna vysokoškolská učebnica pre hutnícke a strojárské fakulty vysokých škôl. 2. vyd. Bratislava: Alfa, 1989. Edícia hutníckej literatúry (Alfa).
- [8] E. MOLLIKOVÁ, P. KALÁB, L. STRÁNSKÝ a J. SEDLÁČEK. Zkouška rázem v ohybu. Brno, 2004. .
- [9] SOJKA, Jaroslav a Petra VÁŇOVÁ. Základy progresivních konstrukčních materiálů: učební text : studijní materiály pro studijní předmět 636-0416, Fakulty metalurgie a materiálového inženýrství [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2012 [cit. 2018-08-03]. ISBN 978-80-248-2578-6.
- [10] Kovové materiály - Zkouška rázem v ohybu metodou Charpy - Část 1: Zkušební metoda: ČSN EN ISO 148-1 (420381). Praha: Český normalizační institut. 2016.
- [11] Mechanické a metalografické zkoušky [online]. Třinec: LABORATOŘE A ZKUŠEBNÝ ENVIFORM, 2018 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://www.laboratore-zkusebny.cz/mechanicke-a-metalograficke-zkousky/>.

- [12] KONOPÍK, Pavel. KOMPATIBILITA VÝSLEDKŮ HODNOCENÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ KONSTRUKČNÍCH MATERIÁLŮ. Plzeň, 2014. Disertace. Západočeská univerzita v Plzni.
- [13] Skálová, J., Kovařík, R., Benedikt, V., Základní zkoušky kovových materiálů, ZČU Plzeň, 3. vydání, ISBN 80 – 7082 – 623 – 1.
- [14] Institute of Physics of Materials: Academy of Science of the Czech Republic [online]. 2010 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <http://www.ipm.cz/group/fracture/vyuka/doc/P07.pdf>.
- [15] HIROSE, Takanori a Mikio ENOEDA. Fabrication of First Wall Component of ITER Test Blanket Module by HIPping Reduced Activation Ferritic/Martensitic Steel. *Advances in Technology of Materials and Materials Processing* [online]. 2011, 1(13), 34-38 [cit. 2018-08-04]. Dostupné z: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=5917>.
- [16] CHOTĚBORSKÝ, Rostislav a Petr HRABĚ. Teplotní závislost houževnatosti kovových materiálů. *MM Průmyslové spektrum*. 2004, (7), 57. DOI: 1212-2572. ISSN 1212-2572.
- [17] Kovové materiály - Zkoušení tahem - Část 1: Zkušební metoda za pokojové teploty: ČSN EN ISO 6892-1. Praha: Český normalizační institut, 2010.
- [18] RASZKOVÁ, Lenka. Studium vtiskového tečení objemových materiálů. Olomouc, 2016. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci.
- [19] ČTVRTLÍK, Radim. Fyzikální vlastnosti tenkých vrstev. Olomouc, 2009. Dizertační práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce Prof. RNDr. Miroslav Hrabovský, DrSc.
- [20] LUDVÍK, Jan, Karel BÍLEK a Štěpán LUDVÍK. Zkoušky tvrdosti. 3. Kladno: Metrotest Kladno, 2002.
- [21] FISCHER-CRIPPS, A.C. Nanoindentation. 2. New York: Springer, 2004. ISBN 978-1-4757-5943-3.
- [22] OLIVER W.C., PHARR G.M. Improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments (1992) *Journal of Materials Research*, 7 (6), pp. 1564-1580.
- [23] Kovové materiály - Zkouška tvrdosti podle Brinella - Část 1: Zkušební metoda: ČSN EN ISO 6506-1. Praha: Český normalizační institut, 2015.
- [24] Zkouška tvrdosti podle Vickerse - Část 1: Zkušební metoda: ČSN EN ISO 6507-1. 1. Praha: Český normalizační institut, 2006.

- [25] Mechanical behavior of materials: engineering methods for deformation, fracture, and fatigue. 4th ed. Boston: Pearson, c2013. ISBN ISBN978-0-13-139506-0.
- [26] JECH, Jaroslav. Tepelné zpracování oceli: metalografická příručka. 4., přeprac. a dopl. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1983.
- [27] Universal Materials Testing Machines [online]. AZoNetwork, 2000 [cit. 2018-08-05]. Dostupné z: <https://www.azom.com/equipment-details.aspx?EquipID=81>.

Seznam symbolů

A	[%]	Tažnost
A_p	-	Tvarová funkce hrotu
ČMI	-	Český metrologický inspektorát
d	[m]	Průměr vtisku
d_0	[m]	Počáteční průměr
D	[m]	Průměr
e	[%]	Prodloužení
E	[MPa]	Modul pružnosti
E^*	[MPa]	Efektivní (kombinovaný) modul pružnosti
E_r	[MPa]	Redukovaný modul pružnosti
F	[N]	Síla
h	[m]	Hloubka vtisku
h_c	[m]	Kontaktní hloubka
h_{max}	[m]	Maximální zátěž
h_p	[m]	Plastická hloubka vtisku
H, H_{IT}	-	Tvrdość
k	-	Součinitel proporcionality
L_0	[m]	Počáteční měřená délka
L_c	[m]	Zkoušená délka
L_e	[m]	Měřená délka průtahoměru
L_t	[m]	Celková délka
L_u	[m]	Konečná měřená délka po lomu
m_E	-	Směrnice pružné části závislosti napětí
M	-	Horní limit stupnice měření
ν	-	Poissonova konstanta
P	[N]	Zatěžující síla
P_{max}	[N]	Maximální zátěž
R	[MPa]	Mez kluzu
R_p	[MPa]	Napětí
R_m	[MPa]	Mez pevnosti
S_0	[m ²]	Počáteční průřez plochy
S_E	[m ²]	Směrnice závislosti zatížení-prodloužení
S_u	[m ²]	Průřezová plocha po lomu
u	[m]	Úhlopříčka