



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

DESTRUKTIVNÍ METODY KONTROLY SVAROVÝCH SPOJŮ

DESTRUCTIVE METHODS OF CONTROL OF WELDING JOINTS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

LUKÁŠ KOPECKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MOJMÍR VANĚK

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie
Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Lukáš Kopecký

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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

Destruktivní metody kontroly svarových spojů

v anglickém jazyce:

Destructive methods of control of welding joints

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současnosti se klade velký důraz na kvalitu svarových spojů. I přes rozvoj nedestruktivních metod zkoušení svarů mají metody destruktivní stále nezastupitelné místo jak ve výzkumu, tak i ve výrobě.

Cíle bakalářské práce:

Provedení literární rešerše se zaměřením na metody zabývající se destruktivním zkoušením svarových spojů. Porovnání používaných metod destruktivního zkoušení svarů a popis základních principů jednotlivých zkoušek.

Seznam odborné literatury:

ASM Handbook. Welding, Brazing and Soldering. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3

FOLDYNA, Václav et al. Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. ISBN 80-857-7163-2.

MESSLER, Robert W. Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6.

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Mojmír Vaněk

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 18.11.2013

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, Csc., dr. h. c
Děkan

ABSTRAKT

KOPECKÝ LUKÁŠ: Destruktivní metody kontroly svarových spojů

Bakalářská práce provedená formou literární rešerše, pojednává o destruktivních kontrolách svarových spojů. Pomocí literární studie dané problematiky jsou v bakalářské práci uvedeny současné metody zabývající se destruktivním zkoušením svarových spojů. Hlavní cíl rešerše je zaměřen na popis základních principů jednotlivých destruktivních zkoušek, jejich postupů, přípravy zkušebních vzorků a na následné vyhodnocení a porovnání zkoušek.

Klíčová slova: destruktivní kontrola, svařování, zkouška, svár

ABSTRAKT

KOPECKÝ LUKÁŠ: Destructive methods of control of welding joints

Bachelor's thesis, the form of a literature review, discusses destructive inspection of welded joints. Using literary study of the issue, there are presented actual methods of destructive testing. The main aim of research is focused on describing the basic principles of the various destructive tests, their procedures, preparation of test samples and subsequent evaluation and comparison tests.

Key words: destructive control, welding, test, weld

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KOPECKÝ, Lukáš. *Destruktivní metody kontroly svarových spojů*. Brno, 2014. 32s., CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Ing. Mojmír Vaněk.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V dne 16.5.2014

.....
Podpis

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Mojmiru Vaňkovi za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Také své rodině za podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
ÚVOD.....	10
1 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ.....	11
1.1 Nedestruktivní kontrola	11
1.2 Destruktivní kontrola	11
2 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	13
2.1 Zkouška tahem.....	13
2.1.1 Princip zkoušky	13
2.1.2 Příprava zkušebních vzorků.....	15
2.1.3 Vyhodnocení zkoušky tahem.....	16
2.1.4 Výsledek zkoušky	17
2.2 Zkouška rázem v ohybu.....	18
2.2.1 Princip zkoušky	18
2.2.2 Příprava vzorků.....	19
2.2.3 Vyhodnocení a výsledek zkoušky	20
2.3 Zkoušky tvrdosti	21
2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	22
2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse	22
2.3.3 Zkouška tvrdosti podle Rockwella	23
2.3.4 Zhodnocení a porovnání statických zkoušek	23
2.3.5 Provedení zkoušky tvrdosti svarových spojů	24
2.3.6 Výsledek zkoušky tvrdosti.....	25
3 OSTATNÍ ZKOUŠKY	26
3.1 Zkouška ohybem.....	26
3.1.1 Princip a postup zkoušky	26
3.1.2 Příprava zkušebních vzorků.....	27
3.1.3 Výsledek zkoušky	27
3.2 Zkouška rozlomením	28
3.2.1 Princip zkoušky	28
3.2.2 Příprava zkušebních tyčí	28
3.2.3 Výsledek zkoušky	29
4 METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY.....	30
4.1 Makroskopická kontrola	30
4.2 Mikroskopická kontrola.....	30
4.3 Výsledek zkoušky	31
5 ZÁVĚR.....	32
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

ÚVOD [11], [12], [17], [22], [30], [33]

Již od dvacátých let 20. století, kdy bylo dříve používáno nýtování a kovářské svařování nahrazeno technologií obloukového svařování, nachází tento způsob zhotovení trvalého nerozebíratelného spoje velké uplatnění téměř ve všech průmyslových odvětvích.

Spolehlivost a bezpečnost strojních součástí je značně závislá na vlastnostech použitých materiálů a jejich svarových spojích. V současnosti tedy neustále rostou požadavky na kvalitu svarových spojů, a proto je jejich kontrola nepostradatelná.

Klíčovou cestou pro zajištění požadované kvality svarů, je hlubší poznání jejich vlastností a chování v obtížných provozních podmínkách, které jsou simulovány na vhodném zkušebním zařízení (obr. 2 a obr. 3). Z tohoto důvodu se po boku velice populárních a rozšířených nedestruktivních zkoušek vyskytují také destruktivní zkoušky svarových spojů. V průběhu rozkvětu průmyslové výroby došlo ke stanovení několika standardizovaných destruktivních zkoušek, zaručujících opakovatelnost výsledků za daných podmínek. Tyto zkoušky slouží k určení tzv. užitečných vlastností, které zajišťují odolnost proti vnějším vlivům, mezi které patří zatížení a jeho charakter, okolní prostředí a teplota. Podobně slouží i pro definici jejich strukturního stavu, jako je struktura, její stabilita, přítomnost poruch a podobně. Užité vlastnosti i strukturní stav jsou vždy zjišťovány na zkušebních vzorcích (obr.1) normalizovaných rozměrů, které jsou odebírány ze zkušebního kusu.



Obr. 1 Zkušební vzorky [33]



Obr. 2 Charpyho kladivo [17]



Obr. 3 Univerzální tvrdoměr [30]

1 KONTROLA SVAROVÝCH SPOJŮ [12], [13], [16]

Zjišťování kvality svarů se odvíjí od požadavků na svarový spoj. Vychází se vždy z obchodní smlouvy, dané zakázky a tomu příslušných výrobových norem nebo technických podmínek. V těchto dokumentech nebo související průvodní dokumentaci musí být přesně specifikován postup provádění kontroly.

Svar se musí kontrolovat a posuzovat jak na povrchu, tak i pod povrchem (uvnitř) svaru. Jakost svaru je možné zjistit pomocí dvou typů kontroly:

- Nedestruktivní kontrola
- Destruktivní kontrola

1.1 Nedestruktivní kontrola [13], [16], [18], [29]

Jestliže je požadována kontrola bez porušení zkoumaného svarového spoje, mluvíme o nedestruktivní metodě. V dnešní době patří nedestruktivní zkoušky mezi nejvíce používané kontroly. Vycházejí z jednoduchého poznatku, pokud se ve svaru nevyskytují vady, nebo jenom malé či málo závažné, tak je svar vyhovující. Nedestruktivní zkoušky jsou nepostradatelné ve všech částech výroby a provozní spolehlivosti. Rozlišujeme je podle toho, jakou vadu identifikují.

Metody pro zjišťování povrchových vad:

- Vizualní
- Kapilární (penetrační)
- Magnetická prášková

Metody pro zjištění vnitřních vad:

- Ultrazvuk (obr. 4)
- Prozáření



Obr. 4 Zařízení pro zkoušku ultrazvukem [29]

1.2 Destruktivní kontrola [3], [11], [13], [18]

Je-li potřeba dokladovat a důkladně kontrolovat i mechanické vlastnosti svarového spoje je nutné provést některou z destruktivních zkoušek. Destruktivní zkoušky svarových spojů se zaměřují na kontrolu pevnostních vlastností, plastických vlastností, houževnatosti, tvrdosti, celistvosti a na určení makroskopických a mikroskopických charakteristik.

Destruktivní kontroly jsou prováděny na zkušebních vzorcích odebraných z kontrolního svarového spoje určeného pro provedení zkoušky a následnou likvidaci. Jelikož je tato zkouška nenávratný proces, nelze ji provést přesně na téže výrobku, který je v zápětí určen pro provoz. Vychází se tedy z předpokladu, že pokud všechny zkoušky kontrolovaného kusu vyhovovaly stanoveným požadavkům, tak použitá technologie svařování bude schopna zaručit stejně kvalitní výsledky i u dalších vyrobených kusů. Tento předpoklad je zaručen pouze pokud budeme dostatečně přesně dodržovat všechny technologické podmínky použité při svařování zkušebního kusu.

Pro uskutečnění destruktivní metody je potřeba kvalifikovaný pracovník a příslušná laboratoř (obr. 5) vybavená zkušebními přístroji, mezi které patří Charpyho kladivo, tvrdoměry, trhací stroj a podobně.

Nejpoužívanější destruktivní zkoušky:

- Zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkoušky tvrdosti
- Zkouška v ohybu
- Zkouška rozlomením
- Zkouška makroskopická a mikroskopická



Obr. 5 Zkušební laboratoř [3]

2 ZKOUŠKY MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ

Destruktivní zkoušky jsou ve výrobě, ale i ve výzkumu často využívány pro zjištění mechanických vlastností svarového spoje. Mezi základní zkoušky určující vlastnosti patří:

- Zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkoušky tvrdosti

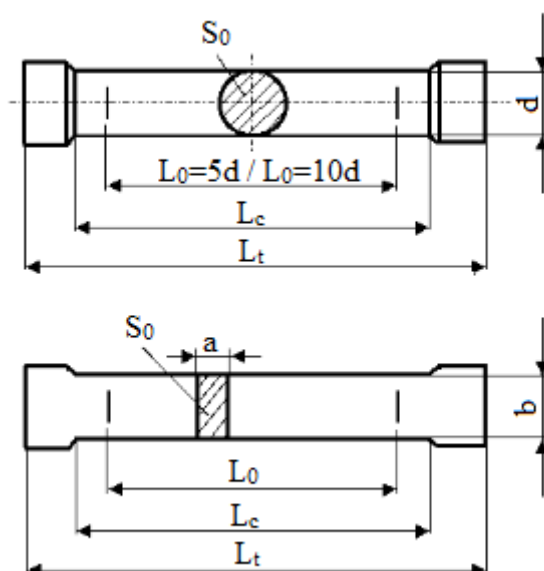
2.1 Zkouška tahem [13], [22]

Zkouška tahem je nerozšířenější statickou zkouškou a zároveň jednou ze základních a nejdůležitějších zkoušek vůbec. Je prováděna na trhačím stroji, pomocí kterého je zjištěna a zaznamenána závislost prodloužení zkušební tyče na působící síle F . Ze které jsou následně určeny požadované vlastnosti, zejména:

- Mez pevnosti R_m
- Mez kluzu R_e
- Smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$
- Tažnost A
- Kontrakce Z

2.1.1 Princip zkoušky [1], [2], [5], [11], [31]

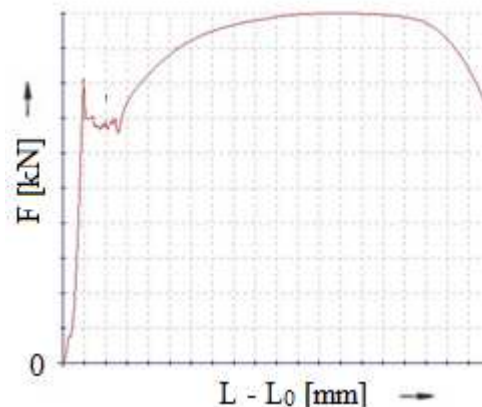
Zkouška je založena na plynulém zatěžování normalizované zkušební tyče odebrané podél nebo napříč svarovým spojem, až do jejího přetržení. Normalizovaná zkušební tyč je kruhového nebo v případě zkoušení plechu obdélníkového průřezu (viz obr. 6). Rozměry zkušebních tyčí jsou uvedeny v příslušné normě. Jsou stanoveny dva typy zkušebních tyčí a to poměrné a nepoměrné. Pro poměrné tyče je jednoznačně dán poměr k počáteční měřené délky L_0 k druhé odmocnině počátečního S_0 . Doporučené hodnoty k jsou 5,65 a 11,3. Poměrné zkušební tyče je nutné použít pro zkoušku, kde je požadováno určení tažnosti A . Zkušební vzorky jsou na krajích opatřeny hlavou, která slouží pro upnutí do čelistí zkušebního stroje tak, aby osa zkušební tyče ležela v ose čelistí stroje.



(L_0 - počáteční měřená délka, L_c - zkoušená délka, L_t - celková délka tyče, S_0 - výchozí průřez tyče, d - průměr zkoušené délky, a - tloušťka zkušební ploché tyče, b - šířka zkoušené délky ploché zkušební tyče)

Obr. 6 Příklady zkušebních tyčí pro zkoušku tahem [31]

Ve zkušebním trhacím stroji dochází za definovaných podmínek (teplota, rychlost zatěžování a podobně) k jednoosému zatěžování plynule rostoucí silou a tudíž nastává deformování tyče, tyč se prodlužuje z počáteční délky L_0 na konečnou délku L_u . Stejně tak dochází ke změně počátečního příčného průřezu S_0 na konečnou plochu S_u , až při určitém tahovém zatížení dojde k destrukci. Na základě těchto veličin je vykreslen graf závislosti síly a prodloužení, viz obr. 7.



Obr. 7 Záznam z tahové zkoušky [34]

Avšak je možnost přepočtu na často používanou závislost smluvní napětí – poměrná deformace. Vztah pro smluvní napětí R :

$$R = \frac{F}{S_0} \quad [\text{MPa}], \quad (2.1)$$

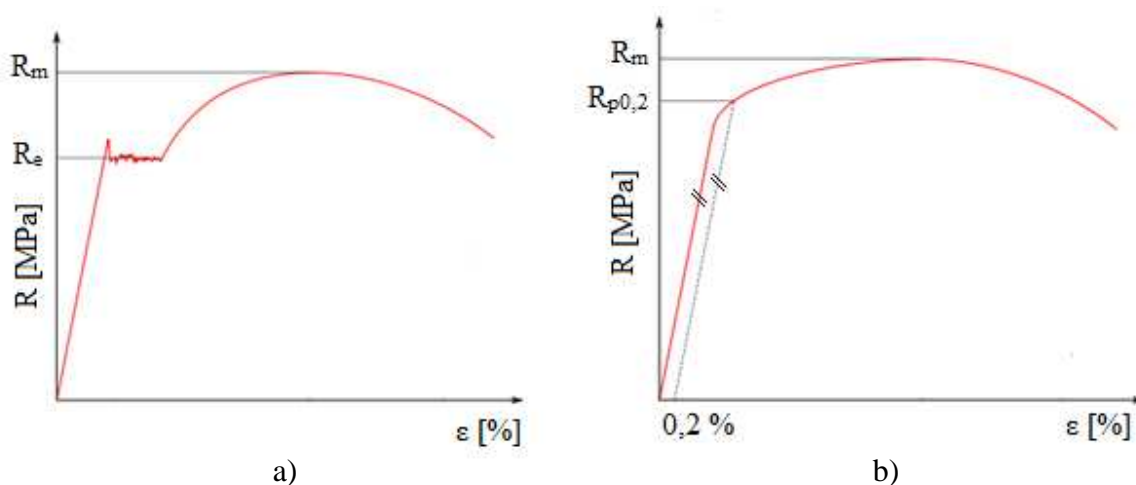
kde: F – působící síla [N]
 S_0 – výchozí průřez tyče [mm^2]

Stanovení poměrné deformace ε je dáno vztahem:

$$\varepsilon = \frac{L - L_0}{L_0} \cdot 100 \quad [\%], \quad (2.2)$$

kde: L_0 – počáteční měřená délka tyče [mm]
 L – okamžitá délka tyče [mm]

Tato závislost je vynesena do tzv. smluvního diagramu napětí – deformace. Vynesený diagram může být s výraznou mezí kluzu (obr. 8a) nebo se smluvní mezí kluzu (obr. 8b).



(a – výrazná mez kluzu, b – smluvní mez kluzu)

Obr. 8 Tahové diagramy [31]

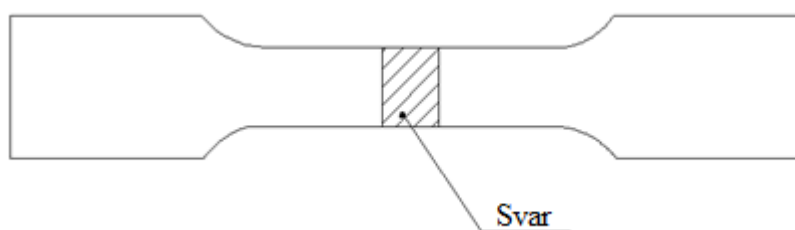
2.1.2 Příprava zkušebních vzorků [5], [11], [20], [22]

Zkušební vzorky musí být vždy odebrány vhodným způsobem dělení z vhodně zvoleného místa. Obecně je za vhodný způsob mechanického nebo tepelného dělení považován takový způsob, při kterém v žádném případě nedochází ke změně vlastností zkušební tyče. Tloušťka zkušební tyče musí být stejná jako tloušťka základního materiálu.

Zkušební tyče lze ze svarového spoje odebrat dvěma základními způsoby, podle toho jsou následně také rozlišovány dva typy tahové zkoušky:

- Příčná zkouška tahem
- Podélná zkouška tahem

Zkušební vzorky, ze kterých se zhotovují tyče pro příčnou zkoušku tahem, jsou odebírány příčně od svarového spoje a to tak, aby po opracování ležela osa svaru ve středu zkoušené délky zkušební tyče (obr. 9). Pro trubky s malým průměrem je dovoleno provést zkoušku na celé trubce (za malý průměr je považováno $D < 18$ mm).

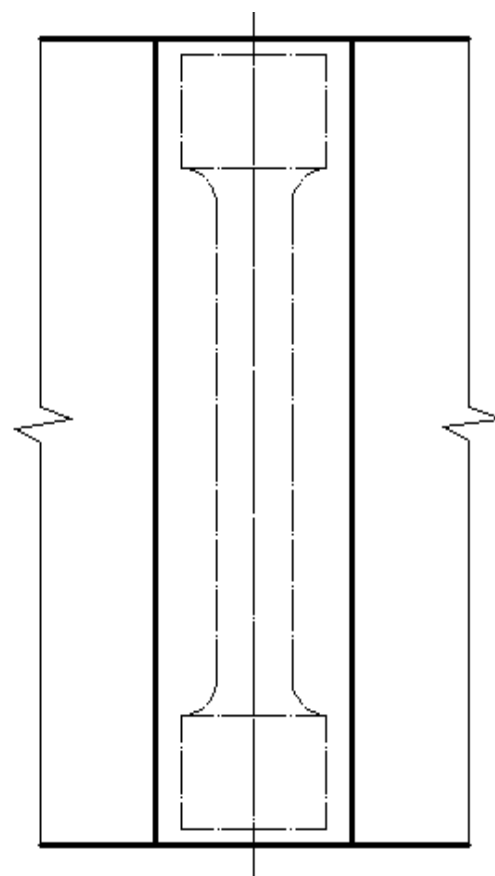
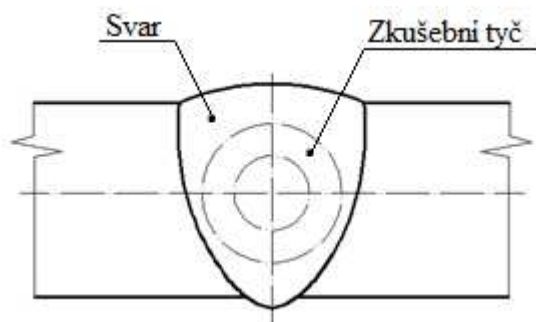


Obr. 9 Vzorek pro příčnou zkoušku tahem [22]

Vzorky pro podélnou zkoušku tahem se odebírají podélně ze svarového spoje, orientace tyče je tedy rovnoběžná s podélnou osou svaru (obr. 10). Po opracování musí být zkoušená délka tyče tvořena pouze svarovým kovem.

Při obou typech odběru, pokud není v normě stanoveno jinak, musí být povrchy zkušební tyče opracovány, aby došlo k odstranění převýšení svaru

Každý zkušební kus musí být důkladně označen tak, aby bylo následně možné určit přesné umístění na výrobku nebo na spoji, ze kterého byl odebrán. Stejně tak i každá zkušební tyč musí být označena, i když je odebrána ze zkušebního kusu.



Obr. 10 Vzorek pro podélnou zkoušku tahem [22]

2.1.3 Vyhodnocení zkoušky tahem [11], [22], [25]

Ze získaného grafu (obr. 8) jsme schopni stanovit následující údaje:

- **mez úměrnosti:** takové napětí, u kterého při jeho uvolnění nedochází k trvalé deformaci tyče. V této oblasti lze uplatnit Hookův zákon, tj. lineární závislost deformace na napětí podle vztahu:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E \text{ [MPa]}, \quad (2.3)$$

kde: σ – napětí [MPa]

ε – deformace [%]

E – modul pružnosti v tahu [MPa]

- **mez kluzu R_e :** zatížení při kterém nastává prudký nárůst deformace bez další zvyšování napětí
 - a) horní mez kluzu R_{eH} – napětí odpovídající prvnímu okamžiku poklesu zatížení
 - b) dolní mez kluzu R_{eL} – nejnižší napětí v průběhu plastického kluzu kovu bez uvažování předchozího jevu

pro výpočet meze kluzu R_e platí vztah:

$$R_e = \frac{F_e}{S_0} \text{ [MPa]}, \quad (2.4)$$

kde: F_e – zatížení na mezi kluzu [N]

- **smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$:** u některých typů materiálů nastává významná mez kluzu, potom se z pravidla zavádí smluvní mez kluzu $R_{p0,2}$. Tato hodnota je rovna napětí, které způsobí trvalé prodloužení 0,2% vzhledem k původní délce vzorku.
- **mez pevnosti R_m :** hodnota napětí při největším zatížení. Po překročení této maximální hodnoty u tvárného materiálu dochází k poklesu křivky (obr. 8) až do okamžiku destrukce.

Vypočítá se ze vztahu:

$$R_m = \frac{F_{\max}}{S_0} \text{ [MPa]}, \quad (2.5)$$

kde: F_{\max} – maximální zatížení [N]

- **tažnost A :** trvalá deformace měrné délky vyjádřené v procentech původní měřené délky. Určuje se v místě přetržení, změna délky je porovnána s původní měřenou délkou. Tažnost patří mezi základní plastické vlastnosti materiálu a lze určit vztahem:

$$A = \frac{L_u - L_0}{L_0} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (2.6)$$

kde: L_u – měřená délka tyče po přetržení [mm]

- **kontrakce Z :** maximální změna příčného průřezu po přetržení zkušební tyče. Představuje další plastickou vlastnost materiálu a vypočítá se ze vztahu:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_0} \cdot 100 \text{ [%]}, \quad (2.7)$$

kde: S_u – průřez krčku tyče po přetržení [mm²]

Výše uvedené materiálové charakteristiky se zkouškou tahem určují u základních materiálů a svarových kovů. Avšak u zkoušení svarových spojů jsou zvláštní specifika. Proto je nutné rozlišovat, zda byla provedena příčná nebo podélná zkouška tahem.

U příčné zkoušky tahem se ve většině případů vyhodnocuje pouze mez pevnosti svarového spoje R_m . Další zkouškou zjištěné charakteristiky, tj. mez kluzu, tažnost a kontrakce slouží pouze jako informativní hodnoty, jelikož se na zkušební tyči při příčné zkoušce může v měřené délce vyskytovat nejen svarový kov, ale i tepelně ovlivněná oblast základního materiálu a vlastní základní materiál.

Při podélné zkoušce tahem je možné určit všechny pevnostní a plastické charakteristiky jako u zkoušení základních materiálů. To z toho důvodu, že pro tuto zkoušku je použita tyč, která byla odebrána pouze ze svarového kovu, nedochází tedy k výskytu více oblastí jako u příčné zkoušky tahem.

2.1.4 Výsledek zkoušky [5], [15], [19], [22]

Výstupem tahové zkoušky je vždy protokol (příloha 1), který musí splňovat požadavky uvedené v normě. Ke správnému vyplnění protokolu, je po zkoušce nutné učinit několik kroků. Po provedení příčné nebo podélné zkoušky tahem jsou výsledky zkoušky vyhodnoceny podle ISO 6892-1 a ISO 6892-2. Dále je nutné pokračovat podle toho, zda je vyhodnocována podélná či příčná zkouška.

U příčné zkoušky tahem se označí poloha lomu, která je následně uvedena v protokolu. Pokud je to nutné, je možné naleptat stranu tyče na makrostrukturu, aby se ulehčilo určení polohy svaru. Kromě údajů podle ČSN EN ISO 6892 se do protokolu o příčné zkoušce tahem uvádí

- odkaz na tuto normu,
- druh a umístění tyčí,
- teplota okolí,
- umístění lomu,
- druh a rozměry nalezených vad.

U podélné zkoušky tahem musí být po přetržení zkušební tyče vyhodnoceny lomové plochy. Případné vady, které mohou nepříznivě ovlivnit zkoušku, je nezbytné zaznamenat do protokolu. Také je nutné prozkoumat, zda se vyskytují rybí oka, což jsou kruhové trhliny, které mají ve středu obvykle struskový vměstek či dutinu. Pokud ano musí být zaznamenány a jako vady se považují pouze jejich středové oblasti. Kromě údajů podle ČSN EN ISO 6892 se do protokolu o podélné zkoušce tahem uvádí

- odkaz na tuto normu,
- druh a umístění tyčí,
- teplota okolí,
- druh a rozměry nalezených vad.



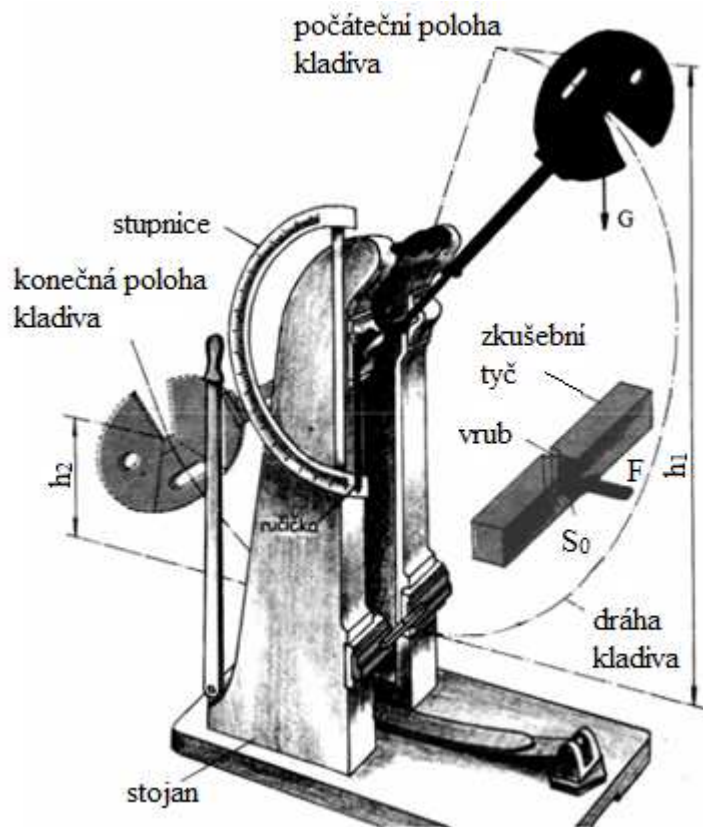
Obr. 11 Vzorek před příčnou zkouškou tahem a po zkoušce [15]

2.2 Zkouška rázem v ohybu [11], [22], [25]

Zkouška rázem v ohybu je představitelem mechanické zkoušky dynamické. Slouží k určení plastických vlastností materiálu (vrubová houževnatost materiálu) při rázovém namáhání a doplňuje tak vlastnosti získané tahovou zkouškou. Při této zkoušce nastává plastická deformace zkušební tyče, a proto je velmi závislá na vnějších činitelích, kterými jsou teplota a rychlost deformace. Na rozdíl od zkoušky tahem, kde zatížení působilo staticky, zde působí kyvadlové kladivo na zkušební tyč rázem. Výsledky této zkoušky vypovídají o odolnosti svarového spoje proti křehkému porušení. Přesto, že je zkouška rázem v ohybu poměrně jednoduchá, lze ze získaných výsledků stanovit podmínky iniciace křehkého porušení a odpovídající přípustnou velikost vad.

2.2.1 Princip zkoušky [11], [18], [22], [25]

Zkouška je založena na jednoduchém principu, který spočívá v přeražení normalizovaného zkušebního tělíška jedním nárazem Charpyho kyvadlového kladiva. Zkušební tělíško o normalizovaném rozměru 10 x 10 x 55 mm, je v příčném směru uprostřed opatřeno V nebo U vrubem patřičných rozměrů (obr. 13), který modeluje apriorní trhlinu v materiálu. Při vlastním rázovém zatížení je u kořene vrubu vyvolána trojosá tahová napjatost, která představuje nejhorší napěťové poměry.



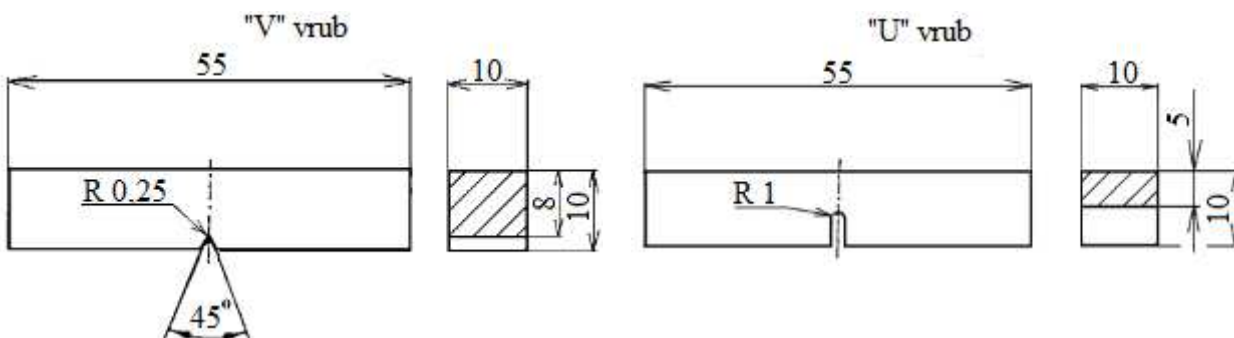
Obr. 12 Princip zkoušky rázem v ohybu [18]

Samotná zkouška je tedy provedena na Charpyho kladivu, kdy do uchyceného vzorku udeří břit kladiva o definované hmotnosti. Vzorek je upevněn tak, aby byl vrub na odvrácené straně úderu kladiva (obr. 12).

Energie vzniklá rázem, kterou zachytí vzorek, vede k jeho destrukci. Velikost energie a typ lomu iniciovaného v kořeni vrubu je kritériem odolnosti materiálu proti křehkému porušení.

2.2.2 Příprava vzorků [7], [11], [22]

Rozměry zkušebních těles jsou předepsané normou ČSN EN ISO 9016 zabývající se umístěním zkušebních tyčí ve svarovém spoji a orientací vrubu. Zkušební vzorek pro zkoušku rázem v ohybu musí být vždy odebrán tak, aby jeho podélná osa byla kolmá na svar.



Obr. 13 Typy vrubů [7]

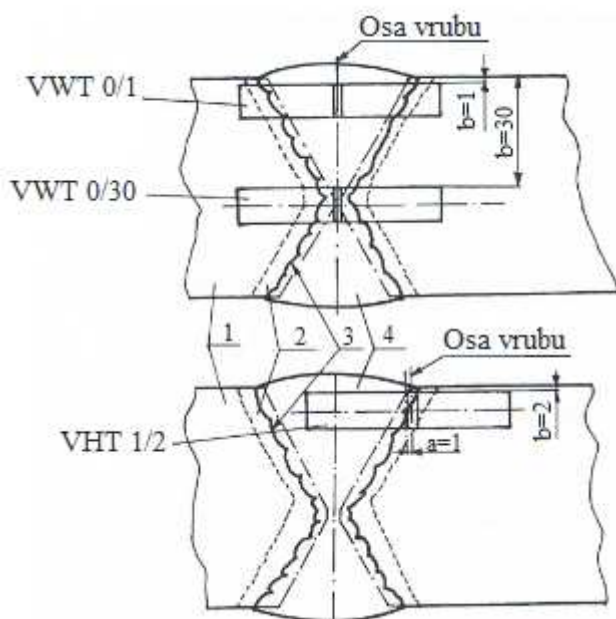
Zpravidla se pro každé stanovené umístění odebírá sada tří zkušebních tyčí. Způsoby provedení vrubu ve vzorku jsou různé, existuje tedy značení, které je založeno na systému několika písmen, charakterizujících vrub.

- | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 1. značka | U: Charpy U vrub
V: Charpy V vrub |
| 2. značka | W: vrub ve svarovém kovu
H: vrub v tepelně ovlivněné oblasti |
| 3. značka | S: povrch tyče s vrubem je rovnoběžný s povrchem spoje
T: vrub kolmo k povrchu |
| 4. značka | a: vzdálenost středu vrubu od referenční linie |
| 5. značka | b: vzdálenost mezi horním povrchem spoje a bližším povrchem tyče |

Některé příklady způsobu značení jsou uvedeny v tabulce 1 a na obrázku 14, více je uvedeno v příloze 2.

Tab. 1 Povrch tyče s vrubem kolmým k povrchu spoje [22]

Odkaz	Střed svaru	Odkaz	Linie natavení / svaru
Značení	Znázornění	Značení	Znázornění
VWT 0/b		VHT 0/b	
VWT a/b		VHT a/b	



kde: 1 – základní materiál
2 – tepelně ovlivněná oblast
3 – linie natavení
4 – svarový kov

Obr. 14 Příklad značení [22]

2.2.3 Vyhodnocení a výsledek zkoušky [7], [10], [11], [22], [25]

Výrobní normy vyžadují různé kritéria pro vyhodnocení zkoušky. Nejčastěji je však požadována minimální hodnota nárazové práce (vrubové houževnatosti) na vzorcích s V vrubem, nebo minimální příčné rozšíření zkušební tyče, či požadavek na 50% tvárného lomu, vše při minimální teplotě. Případně i určení přechodové teploty, která je důležitou charakteristikou vlastností, mnohdy důležitější než maximální hodnota vrubové houževnatosti.

- **Nárazová práce K:** práce, která se spotřebuje na přeražení zkušební tyče. Její hodnota se určí ze vztahu:

$$K = G \cdot (h_1 - h_2) \quad [J], \quad (2.8)$$

kde: G – gravitační síla [N]
 h_1 – výchozí výška kladiva vzhledem ke vzorku [m]
 h_2 – výška kladiva po přeražení vzorku [m]

Rozlišujeme nárazovou práci u vzorku s V vrubem a s U vrubem. Nárazová práce potřebná k přeražení vzorku s V vrubem je označována KV, práce potřebná k přeražení vzorku s U vrubem je značena KU.

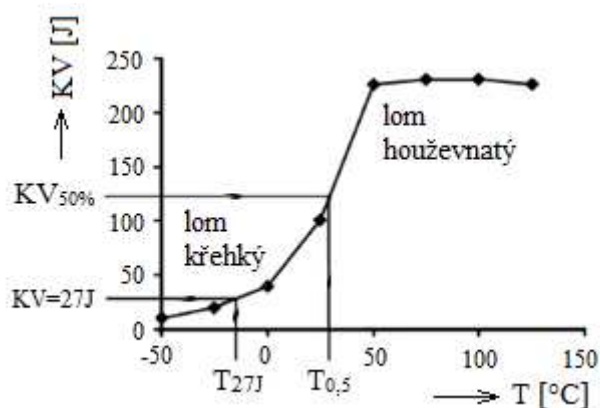
- **Vrubová houževnatost KC:** podíl nárazové práce a počátečního průřezu zkušební tyče v místě vrubu. Vypočítá se podle vzorce:

$$KC = \frac{K}{S_{0V}} \quad [J \cdot \text{cm}^{-2}], \quad (2.9)$$

kde: S_{0V} – počáteční průřez tyče v místě vrubu [cm^2]

- **Závislost nárazové práce na teplotě:** u zkoušky rázem v ohybu je prokázána obecná zákonitost silné závislosti vrubové houževnatosti, případně procento křehkého lomu na teplotě. Snižuje-li se teplota, při které je zkouška prováděna, klesá nárazová práce. K poklesu dochází buď prudce, nebo pozvolně, viz obr. 15. Oblast prudkého poklesu je nazývána jako přechodová (tranzitní) oblast, kde dochází v úzkém teplotním rozmezí k značnému poklesu nárazové práce. Významnou hodnotou této oblasti je tranzitní teplota,

při které houževnatý lom (vznikající za vyšších teplot) přechází do lomu křehkého (vznikající za nižších teplot). Tranzitní teplota se určuje z přechodové křivky, která je získána z potřebného množství zkoušek rázem v ohybu, provedených při různých teplotách. Teplotní závislost odolnosti proti křehkému porušení je velice důležitá ve všech odvětvích strojírenství. Hlavní snahou je co největší posun přechodu mezi křehkým a houževnatým stavem směrem k nižším teplotám. U svarových spojů toho lze dosáhnout likvidací hrubé dendritické struktury, vysokou čistotou svaru, úzkou oblastí tepelného ovlivnění, eliminací vnitřních pnutí předehřevem a podobně.



Obr. 15 Závislost nárazové práce na teplotě [10]

Výstupem je stejně jako u všech ostatních destruktivních zkoušek protokol, který by měl obsahovat tyto údaje:

- odkaz na normu, podle které byla zkouška provedena,
- pojmenování zkušební tyče,
- typ zkoušky,
- náčrtek pokud je požadován,
- typ a rozměry zjištěných vad.

2.3 Zkoušky tvrdosti [11], [22], [25]

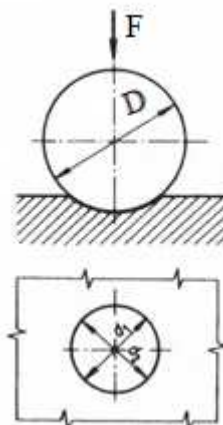
Společně se zkouškou tahem a zkouškou rázem v ohybu jsou zkoušky tvrdosti základními destruktivními zkouškami svarových spojů. Zkoušky tvrdosti jsou rychlé a levné zkoušky, sloužící k odhadu mechanických vlastností. Provádí se za účelem zjištění nejnižší a nejvyšší hodnoty tvrdosti jak základního materiálu, tak svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti. Tvrdost lze definovat jako odolnost povrchu proti statickému nebo dynamickému vnikání cizího tělesa. Zkoušky tvrdosti je možno rozdělit podle několika hledisek. Podle principu zkoušky se dělí na zkoušky vnikací, vrypové, nárazové a odrazové. Podle rychlosti zatěžující síly jsou zkoušky statické nebo dynamické. Podle účelu měření se rozlišují zkoušky makrotvrdosti a mikrotvrdosti. Přehled zkoušek tvrdosti je uveden v tabulce 2.

Tab. 2 Zkoušky tvrdosti [25]

Zkoušky makrotvrdosti	Statické	Vrypové	Metoda Martensova
		Vnikací	Metoda Brinell
			Metoda Vickers
	Dynamické	Plastické nárazové	Metoda Rockwell
			Poldi kladívko
		Elastické odrazové	Baumannovo kladívko
Zkoušky mikrotvrdosti	Statické	Vnikací	Shoreho skleroskop
			Duroskop
			Metoda Vickers
			Metoda Knoop

Avšak pro zkoušky svarových spojů jsou používány především statické vnikací zkoušky, podle normy ČSN EN ISO 9015-1 pak zejména zkouška podle Vickerse případně podle Brinella. Proto se dále zaměříme pouze na popis statických vnikacích zkoušek.

U statických zkoušek tvrdosti je vnikající těleso vtlačováno do zkušební vzorku silou, která se plynule zvětšuje. Při zkoušce dojde k porušení povrchu zkoušeného materiálu a vznikne vtisk. Vnikající těleso nesmí podléhat plastickým deformacím, proto je důležité, aby mělo co nejvyšší tvrdost a mez pružnosti.



Obr. 16 Zkouška tvrdosti podle Brinella [26]

2.3.1 Zkouška tvrdosti podle Brinella [25], [26], [28]

Princip zkoušky spočívá ve vtlačování vnikacího tělesa, nejčastěji ocelové kuličky nebo kuličky z tvrdokovu, do povrchu vzorku předepsaným zatížením po stanovenou dobu. Po odlehčení zůstane v povrchu vzorku trvalý vtisk, jehož průměr se opticky změří. Princip měření tvrdosti HB je znázorněn na obr. 16.

Výpočet tvrdosti HB se provádí podle vztahu:

$$HB = \frac{0,102 \cdot 2 \cdot F}{\pi \cdot D \cdot \left(D - \sqrt{D^2 - d_0^2} \right)}, \quad (2.10)$$

kde: D – průměr kuličky [mm]

d_0 – střední průměr vtisku, zjištěn jako průměrná hodnota z d_1 a d_2 [mm]

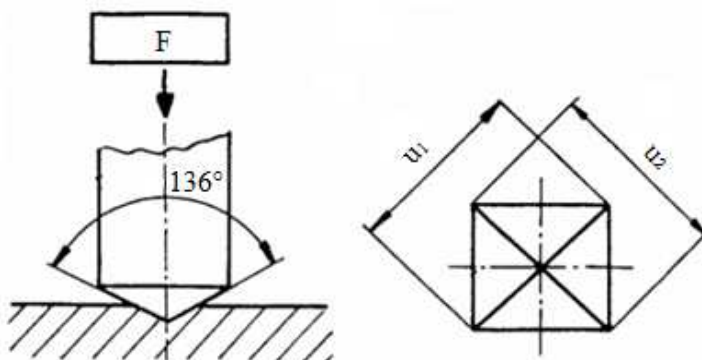
F – zkušební zatížení [N]

V praxi se většinou pro urychlení a usnadnění využívají tabulky, ze kterých je možné vyčíst příslušnou tvrdost HB na základě zvolené kuličky a zatěžovací síly.

Pro zkoušku se používají kuličky o průměru D = 10; 5; 2,5; 2 a 1 mm. Minimální tloušťka zkušebního tělesa musí být rovna nejméně desetinásobku hloubky vtisku, aby byla zaručena plastická deformace pouze ve zkušebním tělese. Na základě použité kuličky se volí velikost zatížení, které udává norma. Prodleva zatížení je závislá na zkoušeném materialu, u slitin železa musí být 10 až 15 sekund.

2.3.2 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [14], [25], [28]

Zkouška tvrdosti podle Vickerse je nepoužívanější zkouškou. Její podstata spočívá ve vtlačování indentoru, kterým je diamantový čtyřboký jehlan se čtvercovou základnou a vrcholovým úhlem 136° , do povrchu zkušebního tělesa. Vtlačování je způsobeno zatěžovací silou, která působí po stanovenou dobu. Po odlehčení jsou změřeny úhlopříčky vtisku, ze kterých se určí průměrná hodnota, s touto hodnotou je následně počítáno při určení tvrdosti (obr. 17).



Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Vickerse [14]

Tvrdość podle Vickerse je značena HV a je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu. Výpočet Vickersovy tvrdości je dán podle vzorce:

$$HV = 0,1891 \cdot \frac{F}{u^2}, \quad (2.11)$$

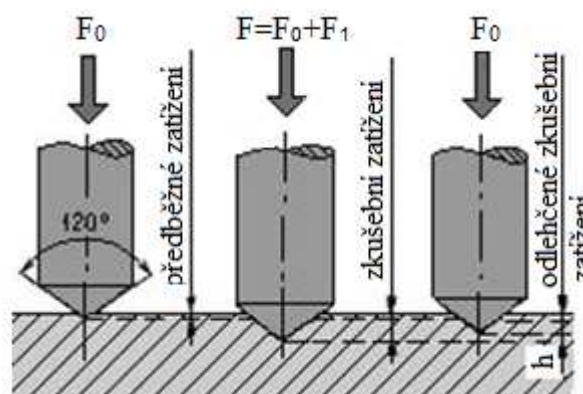
kde: u – je aritmetický průměr dvou délek úhlopříček u_1 a u_2 [mm]

Tloušťka zkušebního tělesa musí být u slitin železa nejméně 1,2 u , v jiných případech 1,5 u . Zatížení musí působit po dobu 10 až 15 sekund, kdy nesmí docházet k žádnému chvění a rázům.

2.3.3 Zkouška tvrdości podle Rockwella [23], [25], [32]

Rozdíl oproti předešlým zkouškám je ten, že u zkoušky podle Rockwella je tvrdość vyhodnocována na základě hloubky proniknutí malé kuličky (\varnothing 1/16" příp. 1/8") nebo diamantového kužele s vrcholovým úhlem 120°, při zatížení definovanou silou. Tato zkouška nemá přepočtové tabulky, Rockwellova tvrdość HR je tedy odečítána přímo ze stupnice hloubkoměru, který je součástí tvrdoměru.

Postup určení tvrdości je znázorněn na obr. 18. Zkušební tělesko se předběžným zatížením F_0 vtlačí do povrchu zkoušeného materiálu a pronikne tak do jisté hloubky. Následně je nastavena stupnice hloubkoměru do počáteční polohy a zatížení se plynule zvětšuje na hodnotu plného zatížení $F=F_0+F_1$, které je třeba ponechat působit po určitý časový interval. Po odlehčení zpět na základní zatížení F_0 se odečte hloubka vtisku přímo na stupnici tvrdości.



Obr. 18 Zkouška tvrdości podle Rockwella [32]

Tloušťka zkušebního tělesa musí být nejméně osmkrát větší než hodnota h , viz obr. 18.

2.3.4 Zhodnocení a porovnání statických zkoušek [23], [25], [28]

Výše uvedené statické vnikací zkoušky tvrdości mají své využití. Zkouška tvrdości podle Brinella je vhodná na zkoušení měkkých a středně tvrdých materiálů s heterogenní strukturou. Tato zkouška je typická velkými zatíženími a tedy velkými vtisky, které umožňují přesnější měření. Na druhou stranu, ale mohou velké vtisky znehodnotit funkční plochu. Výhodou je, že zkouška nevyžaduje dokonalý povrch a není tolik citlivá na přesné dodržení zkušebních podmínek, dále Brinellův tvrdoměr oproti tvrdoměrům Vickerse a Rockwella není tak náchylný na vnější otřesy. V neposlední řadě, je velkou výhodou této metody, jednoduchý, levný a snadno vyměnitelný indenter. Tato metoda má i své nevýhody. Není vhodná pro měření velkých tvrdości a také měření kruhového vtisku, je obtížnější a zdlouhavější nežli měření čtvercového vtisku podle Vickerse.

Vickersova zkouška je především zkouškou laboratorní. Je vhodná pro práce, kde je požadována větší přesnost. Využití také nachází v měření tvrdości tenkých předmětů, či různých povlakových vrstev, protože vtisky jsou poměrně malé a mělké. Hlavní výhodou této metody je, že výsledek měření tvrdości teoreticky není závislý na velikosti zatížení, jelikož si jsou různé velké vtisky geometricky podobné. Z důvodu malých vtisků, je zkouška nevhodná pro měření tvrdości materiálů hrubé struktury, mohlo by dojít ke změření tvrdości pouze na zrna jedné fáze.

Rockwellova metoda se vyznačuje především svou rychlostí a pohodlností. Je používána zejména při hromadné a automatizované kontrole. U zkoušky podle Rockwella je měřena hloubka vtisku a hodnota tvrdości je odečítána přímo ze stupnice tvrdoměru, nemá tak

nepřesnost geometrie vtisku vliv na hodnotu tvrdosti jako je tomu u zkoušky podle Brinella a Vickerse. Avšak velký vliv na hodnotu tvrdosti má i malé poškození nebo nepřesnost tvaru kužele, proto přesnost naměřené tvrdosti je menší než u Brinella nebo Vickerse.

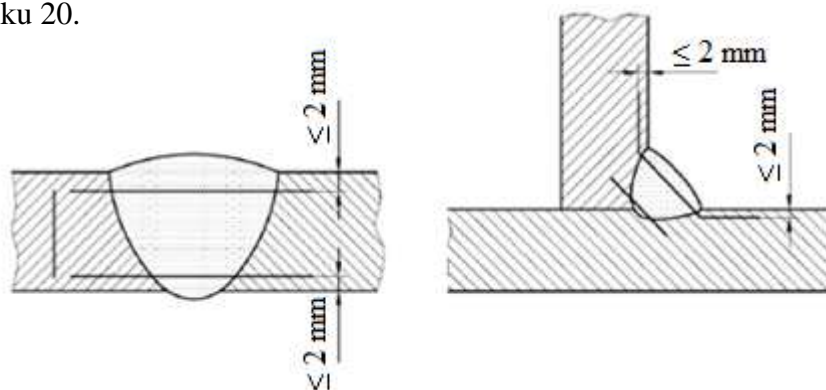
2.3.5 Provedení zkoušky tvrdosti svarových spojů [8], [22]

Jak již bylo zmíněno, zkoušky tvrdosti svarových spojů se provádí metodou podle Vickerse, kde je zkouška provedena podle normy ČSN EN ISO 6507-1, případně zkouškou podle Brinella podle normy ČSN EN ISO 6506-1. Na měření tvrdosti úzkých svarů se používá zkouška mikrotvrdosti podle Vickerse, ČSN EN ISO 6507-1.

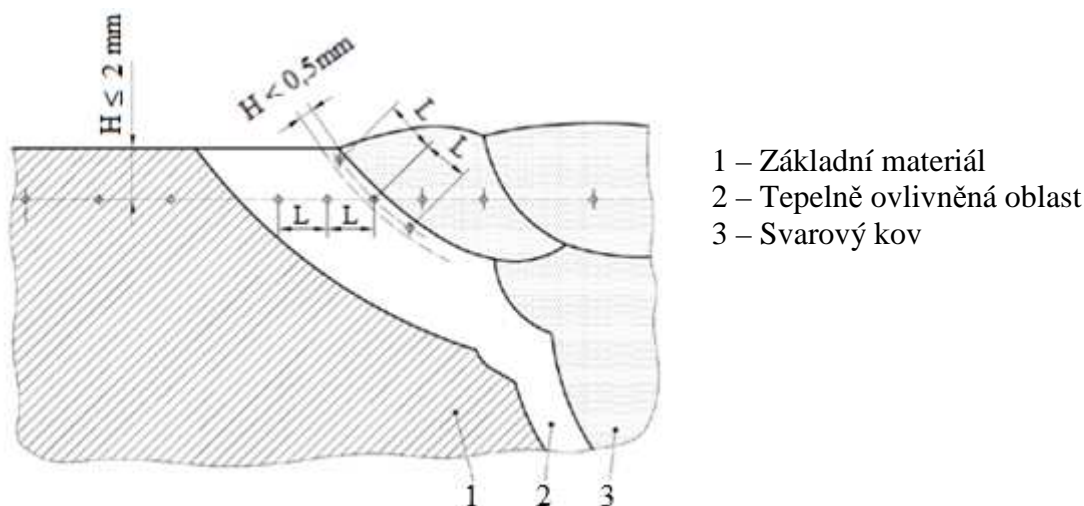
Zkušební vzorky musí být připraveny podle výše uvedených norem. Příčný řez zkušebního vzorku musí být proveden mechanickým řezáním, zpravidla příčně na svarový spoj. Při této operaci a následující přípravě povrchu je důležité dbát na to, aby tvrdost zkoušeného povrchu nebyla ovlivněna metalurgickými změnami. Povrch musí být vhodně upraven, aby bylo možné přesně změřit úhlopříčky, případně průměr vtisku v různých oblastech svarového spoje.

Zkoušky tvrdosti mohou být provedeny ve formě řady vtisků, značeny R, nebo jako jednotlivé vtisky, značeny E.

- **Řada vtisků R:** Pro zjištění tvrdosti je provedeno několik vtisků, seřazených do řad (obr. 19). Jejich vzdálenost od povrchu musí být volena tak, aby tyto řady nebo jejich části umožnily hodnocení svarových spojů. Je třeba provést takové množství vtisků, aby bylo zajištěno, že je měřena tvrdost přes všechna pásma (základní materiál, tepelně ovlivněná oblast, svarový kov) a aby bylo možné určit oblast se zvýšenou nebo sníženou tvrdostí vzniklou v důsledku svařování. Rozmístění vtisků pro jednotlivé oblasti svarového spoje udává norma ČSN EN ISO 9015-1. Příklad umístění vtisků je znázorněn na obrázku 20.

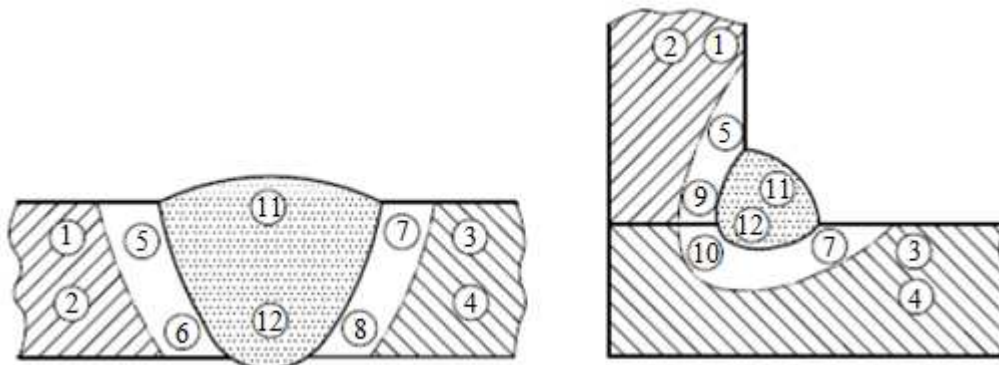


Obr. 19 Příklady řad vtisků [8]



Obr. 20 Umístění vtisků na tupém svaru [8]

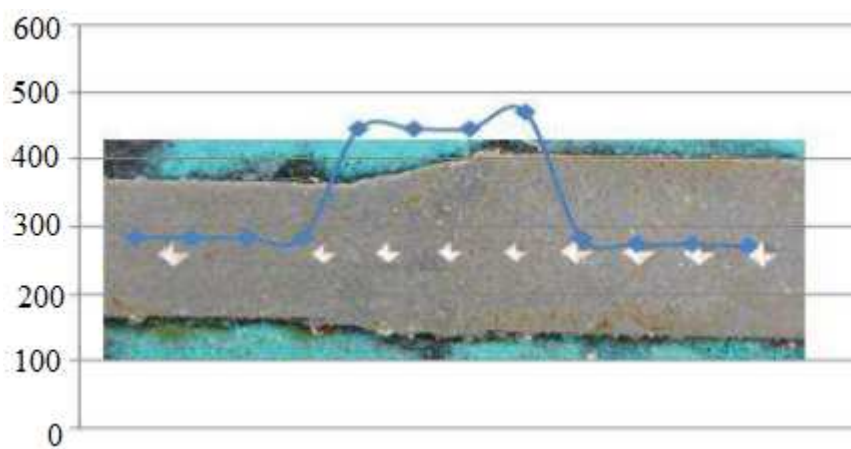
- **Jednotlivé vtisky E:** Existují typické oblasti pro jednotlivé vtisky, které jsou znázorněny na obr. 21. Při zkoušení jednotlivými vtisky je nutné číslovat zkoušené oblasti. Skupina vtisků 1 až 4 určuje tvrdost na tepelně neovlivněném základním materiálu, soubor vtisků 5 až 10 informuje o tepelně ovlivněné oblasti a skupina 11 a 12 o svarovém kovu. Aby se předešlo vlivu deformace způsobené nejbližším vtiskem, musí být dodržena minimální vzdálenost, mezi středy jednotlivých vtisků.



Obr. 21 Příklad oblasti jednotlivých vtisků [8]

2.3.6 Výsledek zkoušky tvrdosti [2], [22]

Po provedení vtisků, jsou jednotlivé naměřené hodnoty zaznamenány. Vynesou-li se hodnoty tvrdosti v závislosti na umístění vtisku do grafu, je zřejmý průběh tvrdosti v základním materiálu, tepelně ovlivněné oblasti a svarovém kovu. Graf má zpravidla tvar znázorněný na obr. 22, kde nejvyšší tvrdost je v tepelně ovlivněné oblasti.



Obr. 22 Průběh tvrdosti [2]

Zjištěné hodnoty tvrdosti musí být zaznamenány v protokolu v závislosti na umístění vtisku. Spolu s hodnotami tvrdosti se do protokolu uvádí:

- typ zkoušky,
- typ svaru,
- tloušťka materiálu,
- metoda svařování,
- přídatný materiál,
- tepelné zpracování.

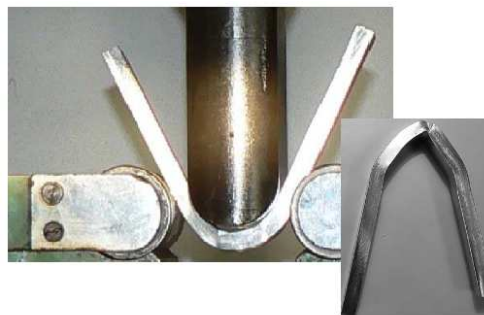
3 OSTATNÍ ZKOUŠKY

Ne vždy je u zkoušeného svarového spoje nutné, znát jeho materiálové charakteristiky. Provádějí se proto i ostatní zkoušky, charakterizující kvalitu svarového spoje, mezi které patří zkouška ohybem a zkouška lámavosti.

3.1 Zkouška ohybem [11], [18], [22]

Zkouška ohybem (zkouška lámavosti) patří mezi statické mechanické zkoušky. Podstatou zkoušky je ohybová deformace. Je určena pro posuzování plastických vlastností materiálů a využívána především pro zkoušení deformační schopnosti tupých svarových spojů za studena.

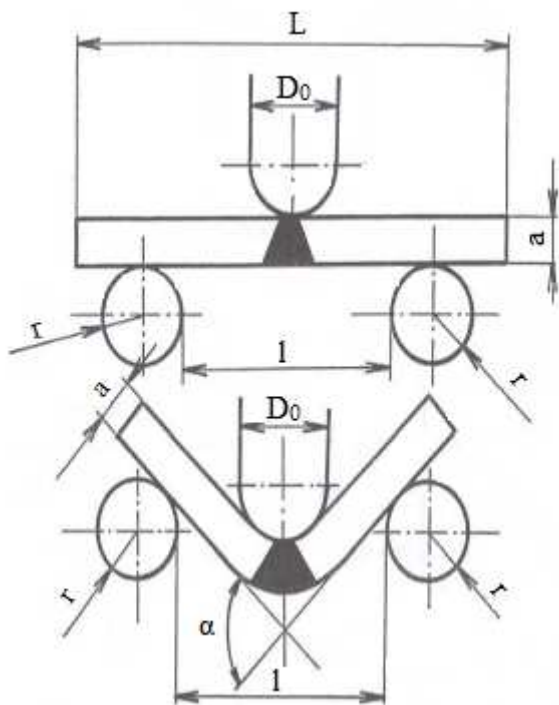
Pro zkoušku ohybem je vydána norma ČSN EN ISO 5173, která určuje postup k provádění příčných zkoušek ohybem zkušebních tyčí, ze stany kořene nebo z lící strany a příčných bočních zkoušek lámavosti tupých svarů.



Obr. 23 Průběh zkoušky ohybem a rozlomený vzorek [18]

3.1.1 Princip a postup zkoušky [6], [11], [18], [22], [25]

Zkoušená tyč odebraná příčně nebo podélně ze svarového spoje o tloušťce zkoušeného svaru a max. do 30 mm je ohýbána okolo trnu do předepsaného úhlu. Průměr trnu je stanoven na základě tloušťky a pevnosti materiálu. Zkouška je realizována za pokojové teploty. Při zkoušce dochází k plastické deformaci jednosměrným ohybem tak, že jeden z příčných řezů nebo jeden z povrchů svarového spoje je namáhán tahem. Existují dva druhy ohybové zkoušky. Příčná a podélná zkouška ohybem. Pro každý typ je volen rozlišný způsob umístění zkušební vzorku ve svarovém spoji. Před začátkem zkoušky je možné provést lehké naleptání makrostruktury povrchu tažené strany zkušební tyče, pro lepší zvýraznění tvaru a polohy svaru.



(*a* - tloušťka tyče, *l* - vzdálenost podpěr, *L* - délka tyče, *R* - poloměr podpěr, *D* - průměr ohýbacího trnu, α - úhel ohybu)

Obr. 24 Příčná zkouška ohýbacím trnem ze strany kořene [18]

Zkouška je podle normy ČSN EN ISO 5173 prováděna jedním z daných postupů:

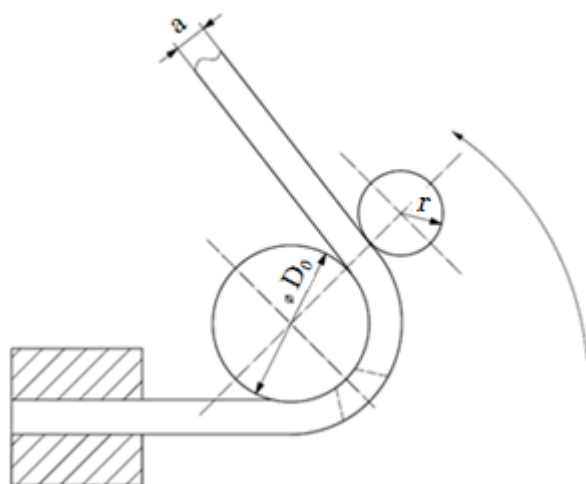
- Zkoušení ohýbacím trnem
- Zkoušení ohýbací kladkou

Při zkoušení ohýbacím trnem se tyč položí na dva rovnoběžné podpěrné válečky nebo na U přípravek pro řízené ohyby. Umístění svaru musí být ve středu vzdálenosti mezi podpěrnými válečky, výjimkou jsou podélné zkoušky ohybem. Ohýbání vzorku musí být způsobeno postupným plynulým zatěžováním uprostřed rozteče, v ose svaru, zatížením působícím na ohýbací trn (tříbodový ohyb), kolmo na povrch zkušební tyče (obr. 24).

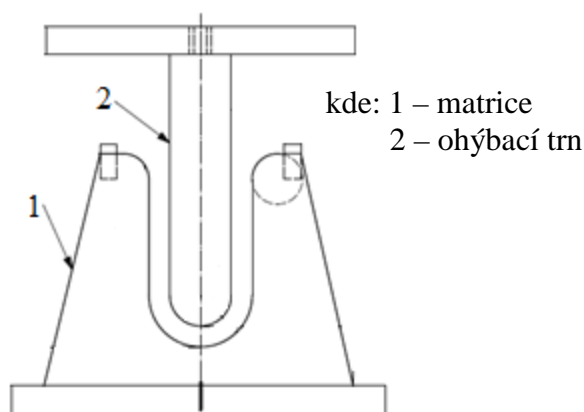
Zkoušku ohybem lze provádět z lící strany nebo ze strany kořene, dále jako příčnou boční zkoušku ohybem (síla působí na bok svaru) nebo pomocí řízeného ohybu na U přípravku. Princip ohýbání na U přípravku je znázorněn na obrázku 26.

Zkouška ohýbací kladkou (obr. 25) je alternativním postupem ohybové zkoušky. Tento postup ohybu je používán zejména pro slitiny hliníku a pro spoje různých materiálů, u kterých svarový kov nebo jeden ze spojovaných materiálů má nižší výraznou nebo smluvní mez kluzu než druhý.

Při provedení zkoušky musí být jeden konec zkušební tyče pevně uchycen v uchopovací části ohýbacího zařízení, které je tvořeno ohýbacím trnem o daném průměru a ohýbací kladkou rovnoběžnou s tímto trnem. Zkušební tyč je ohýbána pozvolným a plynulým otáčením vnější kladky do oblouku, jehož střed leží v ose ohýbacího trnu.



Obr. 25 Zkouška ohýbací kladkou [6]



Obr. 26 „U“ přípravek pro řízené ohyby [6]

3.1.2 Příprava zkušebních vzorků [6], [22]

Pro odběr zkušebních vzorků, ze svarového spoje je nutné volit takový způsob dělení, aby nedocházelo k ovlivnění základního materiálu ani svarového kovu. Přesný způsob odběru pro jednotlivý druh materiálu je uveden v normě ČSN EN ISO 5173. Pokud to není stanoveno nebo dovoleno výrobkovou normou související se zkoušeným svarovým spojem, není dovoleno svarový spoj nebo zkušební tyč tepelně zpracovávat. Vzorky pro příčnou zkoušku ohybem tupých svarů musí být odebrány napříč svarovým spojem z hotového výroku nebo ze svařeného zkušebního kusu tak, aby osa svaru ležela i po opracování uprostřed zkušební tyče nebo ve vhodné poloze pro zkoušení. Pro podélnou zkoušku ohybem tupých svarů musí být umístění voleno tak, aby vzorek ležel podélně ve svarovém spoji. Poloha a směr tyče pro zkoušku ohybem naplátované vrstvy je volena podle výrobkové normy, případně podle dohody ve smlouvě.

Každý zkušební kus musí být příslušně označen, aby bylo možné po jeho odběru vždy přesně určit místo na hotovém výrobku nebo spoji, ze kterého byl odebrán. Stejně tak každá zkušební tyč musí být důkladně označena, z důvodu určení přesného místa odebrání ze zkušebního kusu.

3.1.3 Výsledek zkoušky [6], [11], [22]

Výsledek zkoušky ohybem je zejména funkcí úhlu ohybu, vnitřního průměru, na který je tyč ohýbána a velikostí průřezu tyče. Kritériem odolnosti u zkoušky lámavosti je dosažení požadovaného úhlu bez vzniku samostatných vad větších než 3 mm v jakémkoli směru. Za ideální výsledek je považováno dosažení úhlu 180° bez porušení nebo vzniku vad.

Po vykonání zkoušky musí být zkontrolován vnější povrch i boční strany zkušební tyče. Vyhodnocení zkušební tyče se musí uvést do zkušebního protokolu podle příslušné normy výrobku.

Zkušební protokol zahrnuje zejména následující informace:

- odkaz na normu, podle které byla zkouška vykonána,
- identifikace zkušební tyče (označení, druh základního materiálu atd.),
- druh a značku zkoušky ohybem,
- zkušební podmínky,
- druh a rozměry zjištěných vad,
- úhel ohybu.

3.2 Zkouška rozlomením [12], [22]

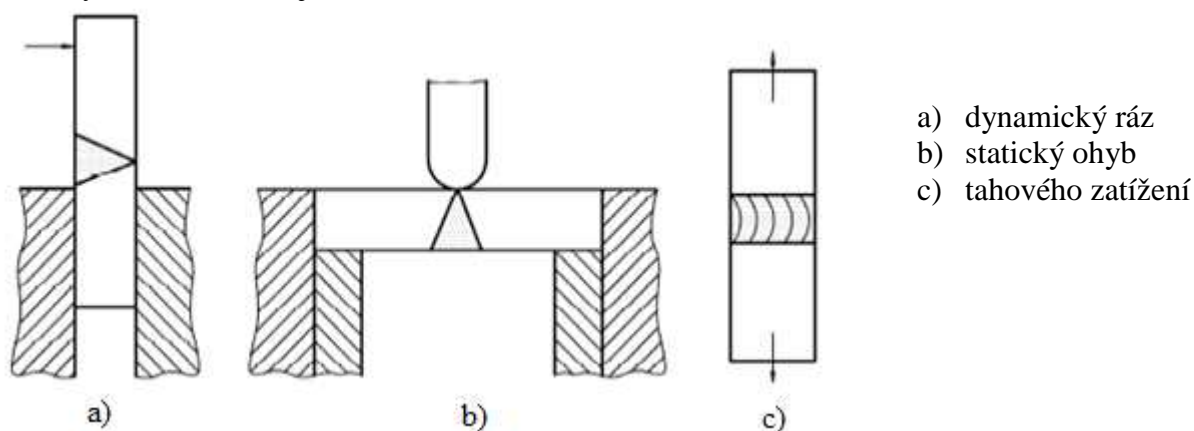
Zvláštním způsobem destruktivního zkoušení, je zkouška rozlomením podle ČSN EN ISO 9017. Tato zkouška je nejjednodušší zkouškou pro zjištění rozměrů a rozmístění vnitřních vad ve svaru, jako jsou trhliny, dutiny, pevné vměstky, studené spoje, neprůvary apod. Používá se především při vyhodnocování zkoušek svářečů.

3.2.1 Princip zkoušky [9], [22]

Základní princip zkoušky spočívá v rozlomení spoje ve svarovém kovu, aby bylo možné zkontrolovat lomovou plochu a zjistit tak kvalitu svarového spoje. Lom je způsoben ohybem nebo tahem při statickém nebo dynamickém zatížení. Mimoto iniciace lomu bývá ovlivněna vrubem a teplotou. Rozlomení může být provedeno:

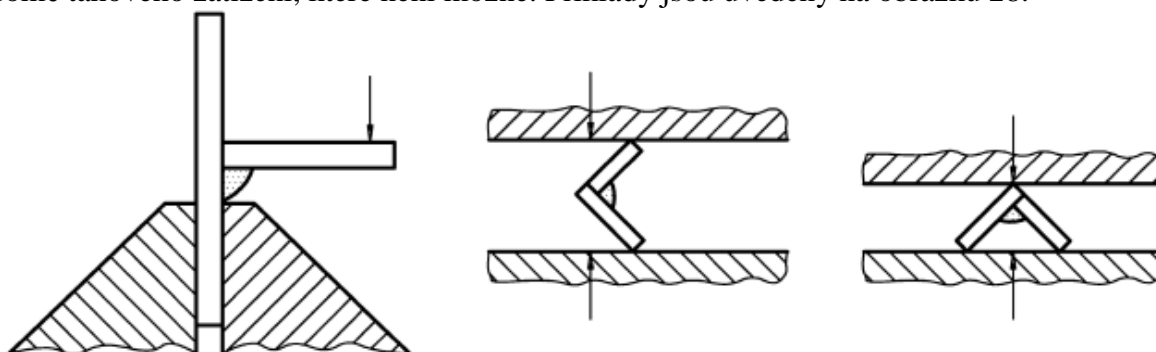
- dynamickým rázem, např. kladivem,
- stlačením ve svěráku, v ohýbacím stroji, nebo v dílenském lisu,
- působením tahového zatížení.

Pro rozlomení tupých svarů lze využít jednu ze tří uvedených metod. Názorné provedení jednotlivých metod ukazuje obrázek 27.



Obr. 27 Příklady zkušebních metod pro tupé svary [9]

Při zkoušení koutových svarů se používají podobné zkušební metody jako u tupých svarů, kromě tahového zatížení, které není možné. Příklady jsou uvedeny na obrázku 28.



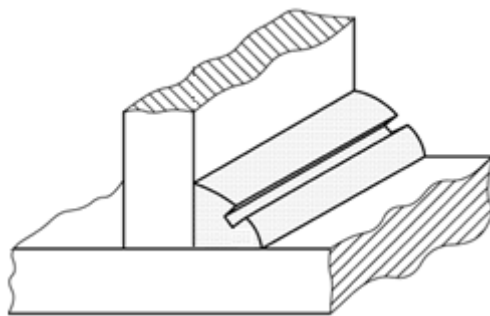
Obr. 28 Příklady zkušebních metod pro koutové svary [9]

3.2.2 Příprava zkušebních tyčí [9], [22]

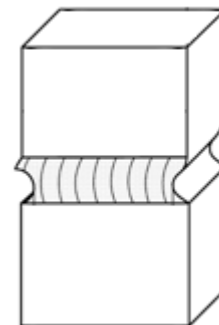
Z každého zkušebního kusu musí být zhotoveny alespoň dvě zkušební tyče. Metoda odběru nesmí způsobovat škodlivé tepelné nebo mechanické působení. Po odebrání se zkušební tyč označuje, aby ji bylo možné přesně identifikovat. Pro snadnější rozlomení lze tyč dále upravit těmito způsoby:

- odstraněním převýšení svarů,
- zhotovením podélného vrubu (obr. 29),
- zhotovením bočních vrubů (obr. 30).

Používají se vruby čtvercové, oblé nebo ostré. Druh vrubu je volen v závislosti na houževnatosti svarového kovu. Podélný vrub u tupého svaru lze zhotovit jak z lící strany, tak ze strany kořene. Hloubka vrubů musí být dostatečná, aby bylo zajištěno, že lom vznikne ve svarovém spoji.



Obr. 29 Podélný vrub [9]



Obr. 30 Boční vruby [9]

3.2.3 Výsledek zkoušky [9], [22]

Povrch lomu je vizuálně zkontrolován podle normy ČSN EN 970. Pro správnou detekci a zjištění vad se často používá lupa. Vzhled plochy lomu a případné druhy vad včetně jejich umístění musí být zaprotokolovány. V protokolu se uvádějí tyto informace:

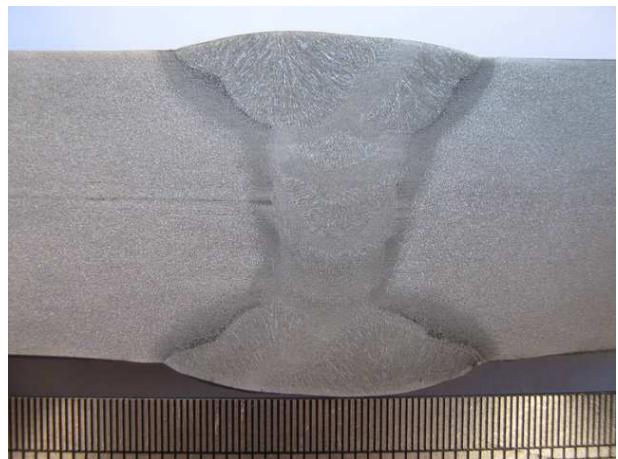
- odkaz na normu, podle které byla zkouška provedena,
- označení vzorku,
- popis vzorku,
- zprávu o druhu, poloze a velikosti všech nepřijatelných vad podle odpovídajícího stupně jakosti.

4 METALOGRAFICKÉ ZKOUŠKY [3], [22]

Často používaným doplňkem testů mechanických vlastností při ověřování svarových spojů je metalografické šetření. Podle použitého zvětšení se metalografické zkoušky rozdělují na makroskopické a mikroskopické. Zkoušky lze provádět v neleptaném nebo naleptaném stavu a své uplatnění nacházejí při odhalování makroskopických nebo mikroskopických charakteristik svarového spoje.

4.1 Makroskopická kontrola [3], [21], [22], [25]

Makroskopická kontrola se provádí vizuální prohlídkou pouhým okem, případně při malém optickém zvětšení (lupa, optický mikroskop do max. 30 násobného zvětšení). Kontrola je realizována na zkušebním vzorku odebraném příčně na osu svaru (příčný řez), který zahrnuje svarový kov, tepelně ovlivněné oblasti (TOO) a základní materiál (obr. 31).



Obr. 31 Makrostruktura [21]

U svarových spojů je makroskopická kontrola základní kontrolní zkouškou jakosti svaru. Po vybroušení, vyleštění a případně naleptání povrchu vzorku umožňuje posoudit kvalitu spoje (přítomnost vad), tvar svaru, způsob kladení svarových vrstev, spojení jednotlivých svarových housenek, zředění svarového kovu se základním materiálem (vztah 4.1), dále pak tvar a rozsah tepelně ovlivněné oblasti.

Zředění se určí ze vztahu:

$$Z_{pz} = \frac{S_p}{S_p + S_z} \cdot 100 \quad [\%], \quad (4.1)$$

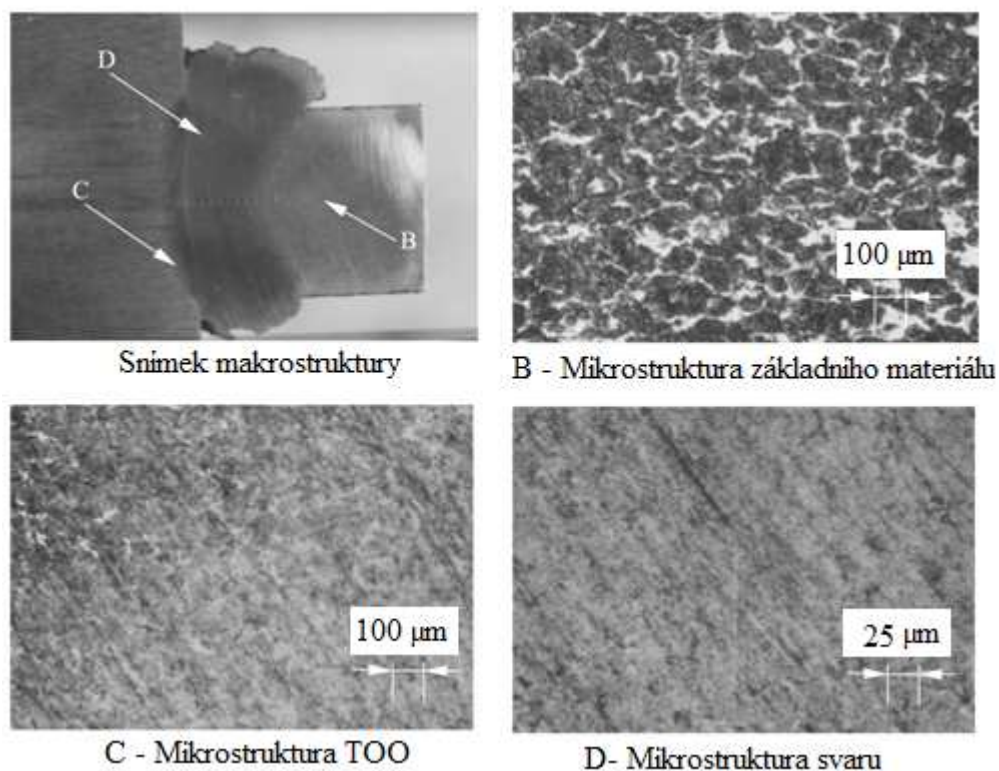
kde: S_p – celková plocha roztaveného kovu svarového spoje [mm^2]
 S_z – celková plocha roztaveného základního materiálu [mm^2]

4.2 Mikroskopická kontrola [3], [22], [24], [25]

Mikrostrukturní rozbor se provádí pomocí mikroskopu, kde zvětšení dosahuje mnohem větších hodnot než u makroskopické kontroly. Obvykle se používají světelné mikroskopy (zvětšení do 1000x), nově také laserové konfokální mikroskopy (zvětšení do 10 000x). Kontrola je stejně jako makroskopické zkoušky prováděna na zkušebních vzorcích orientovaných příčně k ose svaru.

Příprava vzorků je složitá, pracná a veškeré drobné chyby při jejich přípravě mohou mít za následek nesprávné vyhodnocení. Příprava se skládá z odběru vzorku a jeho označení, broušení, leštění a případně leptání. Přičemž musí být voleny takové způsoby dělení, značení, broušení a leštění, aby těmito procesy nebyl ovlivněn kontrolovaný povrch. Leptání lze dle normy uskutečnit ponořením zkušebního vzorku do leptadla, potřením povrchu vzorku případně elektrolytickým leptáním. Po ukončení leptání je nutné vzorek umýt a vysušit.

Mikroskopickou kontrolou lze pozorovat jednotlivá zrna materiálu, hranice zrn, strukturní složky materiálu svaru a tepelně ovlivněné oblasti (obr. 32). Pro svou náročnost a pracnost se zkouška předepisuje pouze pro určité materiály a pro náročné výrobky.



Obr. 32 Mikrostruktura svarového spoje [24]

4.3 Výsledek zkoušky [3], [22]

Stejně jako u všech předchozích zkoušek musí být po jejím provedení a vyhodnocení zhotoven záznam o kontrole, který obsahuje mimo jiné i následující údaje:

- odkaz na normu, podle které byla zkouška provedena
- typ kontroly (makroskopická nebo mikroskopická),
- zda je provedena po naleptání nebo bez naleptání,
- umístění a orientaci zkušební vzorku,
- druh leptadla a metoda leptání,
- popis kontrolované plochy,
- velikosti zvětšení,
- fotografie či náčrty, jestliže je to požadováno.

5 ZÁVĚR

Kontrola svarových spojů je nepostradatelnou součástí strojírenského průmyslu, která je prováděna především za účelem zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti strojních konstrukcí. Bakalářská práce pojednává o základních destruktivních zkouškách, jejichž výsledky slouží k určení kvality a vlastností spoje. V práci je vždy popsán princip dané zkoušky, její postup, příprava vzorků a vyhodnocení.

Destruktivní zkoušky lze provádět za účelem zjištění mechanických vlastností materiálu. Tyto vlastnosti se zjišťují pomocí zkoušky tahem, tvrdosti a rázem v ohybu. Pro zjištění makrostruktury nebo mikrostruktury se provádí metalografické šetření. Ke stanovení deformační schopnosti tupých svarových spojů za studena, slouží zkouška ohybem. Jestliže je prioritní určit pouze výskyt vad ve svaru, používá se zkouška rozlomením.

Typ provedené zkoušky je volen na základě požadavků na svarový spoj, které jsou zpravidla určovány zákazníkem. V praxi se nejčastěji volí zkoušky, které jsou nejjednodušší a zároveň finančně nejvýhodnější. Mezi nepoužívanější patří zkouška tahem, konkrétně zkouška příčná, ze které se obvykle určuje pouze mez pevnosti R_m . I přesto, že u podélné zkoušky tahem lze zjistit všechny pevnostní a plastické charakteristiky, má menší využití. Důvodem je nákladná a složitá příprava zkušební tyče, jelikož je tvořena pouze svarovým kovem. Velké využití dále mají zkoušky tvrdosti, zejména zkouška podle Vickerse, díky teoretické nezávislosti na velikosti zatížení. Jejich velkou předností je jednoduchost a také to, že ve většině případů není nutné vyrábět zvláštní zkušební vzorky. Tvrdost je měřena přímo na výrobku nebo na neovlivněné oblasti zkušební tyče, která již byla použita pro vyhodnocení jiné zkoušky. Své využití také nacházejí metalografické zkoušky, sloužící k určení makroskopických nebo mikroskopických charakteristik svarového spoje. Avšak kontrola mikrostruktury je mnohdy pro svou náročnost nahrazována zkouškou tvrdosti. Zde je stanovena maximální tvrdost, která nesmí být přesažena a tím je docíleno, že se ve struktuře nevyskytuje martenzit, který je charakteristický svou tvrdostí a nežádoucí křehkostí. Další často používanou zkouškou je zkouška rozlomením. Její předností je rychlost a jednoduchost. Je proto ideální kontrolou svarů provedených při svářečských zkouškách, kde není nutné kontrolovat a zjišťovat mechanické vlastnosti nýbrž kvalitu spoje (výskyt vad). Je-li zákazníkem vyžadována hodnota vrubové houževnatosti, pak se používá zkouška rázem v ohybu, která je měřítkem citlivosti svaru vůči místní koncentraci napětí při dynamickém namáhání rázem.

Lze konstatovat, že i přes rozšiřující se nedestruktivní zkoušky, které mají mnoho výhod, jsou destruktivní metody ve výrobě a výzkumu stále nenahraditelné.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [4]

1. ASM Handbook. *Welding, Brazing and Soldering*. Vol. 6. USA: ASM, 2003. 1298 s. ISBN 0-87170-382-3
2. BOGAR, Radek. *Svařování oceli USIBOR 1500 vláknovým Yb-YAG laserem*. Brno, 2013. 60 s., 5 příloh, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
3. Bollhoff. *Akreditovaná zkušební laboratoř* [online]. © 2012 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: www.boellhoff.cz/cs/cz/sluzby/akreditovana_zkusebni_laborato.php
4. Citace.com. *Generátor citací* [online]. © 2004-2013 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://generator.citace.com/>
5. ČSN EN ISO 4136. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Příčná zkouška tahem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 16 s.
6. ČSN EN ISO 5173. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška ohybem*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2010, 24 s.
7. ČSN EN ISO 9016. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rázem v ohybu – umístění zkušebních tyčí, orientace vrubu a zkoušení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013, 12 s.
8. ČSN EN ISO 9015-1. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška tvrdosti spojů svařovaných obloukovým svařováním*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011, 20 s.
9. ČSN EN ISO 9017. *Destruktivní zkoušky svarů kovových materiálů: Zkouška rozlomením*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014, 16 s.
10. Fakulta strojního inženýrství: Ústav materiálových věd a inženýrství. MOLLÍKOVÁ, E., P. KALÁB, L. STRÁNSKÝ a J. SEDLÁČEK. *Zkouška rázem v ohybu* [online]. [cit. 2014-03-28]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/umvi/zk.raz.ohybu.pdf>
11. FOLDYNA, Václav. *Materiály a jejich svařitelnost: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZEROSS, 1999, 296 s. Svařování. ISBN 80-857-7163-2.
12. Hodnocení svarových spojů. *Svět svarů* [online]. [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: http://www.hadyna.cz/svetsvaru/technology/2009-2_Hodnocen%C3%AD%20svarov%C3%BDch%20spoj%C5%AF.pdf
13. Hodnocení kvality svarového spoje: Teoretický úvod k cvičení z technologie I. *ČVUT* [online]. [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
14. Chempoid. *Tvrst (mikrotrvrst) – významná mechanická vlastnost materiálů* [online]. © 2014 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.chempoint.cz/tvrst-mikrotrvrst>

15. CHLÁD, Luboš. *Svařování ocelí s rozdílnými vlastnostmi pomocí Yb-YAG laseru*. Brno, 2013. 55 s., CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
16. KADĚRA, Bohumil. Zjišťování kvality svarů. *Technologie svařování*. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000, roč. 2010, č. 8.
17. Katedry ČZU. *Laboratoř* [online]. © 2012 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://katedry.czu.cz/kdvk/laborator/>
18. KOLAŘÍK, Ladislav. *Destruktivní a nedestruktivní zkoušky svarových spojů* [online prezentace]. Praha: Ústav strojírenské technologie, ČVUT [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TMSV/zkousky_svaru_ndt.pdf
19. KONEČNÝ, Michal. *Parametry jakosti svařování vysokopevnostních materiálů při stavbě autokaroserií* [online]. Pardubice, 2009 [cit. 2014-04-05]. Dostupné z: http://dspace.upce.cz/bitstream/10195/34433/1/KonecnyM_parametry%20svarovani_ES_2009.pdf. Diplomová práce. Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera. Vedoucí práce doc. Ing. Eva Schmidová, Ph.D.
20. MESSLER, Robert W. *Principles of Welding: Processes, Physics, Chemistry, and Metallurgy*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1999, 662 s. ISBN 04-712-5376-6
21. Metallurgical testing. *Macrostructure analysis* [online]. [cit. 2014-05-07]. Dostupné z: http://www.professionaltesting.co.th/web_page/macrostructure
22. PODHORA, Jiří. *Destruktivní zkoušení základních materiálů a svarových spojů*. Brno: TDS Brno – SMS, s.r.o., 2005. ISBN 80-903386-4-X.
23. PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2003, 516 s. ISBN 80-720-4283-1.
24. SAHIN, Mumin a H. Erol AKATA. An investigation on the effect of dimensional differences in friction welding of AISI 1040 specimens. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2003, roč. 55, č. 5, s. 9.
25. SKÁLOVÁ, Jana, Rudolf KOVAŘÍK a Vladimír BENEDIKT. *Základní zkoušky kovových materiálů*. 3. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, Strojní fakulta, 2000, 175 s. ISBN 80-708-2623-1.
26. Strojírenská technologie. *Vlastnosti materiálů – tvrdost* [online]. 2005-2007 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.strojirenstvi.wz.cz/stt/rocnik1/06b_tvrdost.php
27. Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno. *OVMT – tahová zkouška* [online]. [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: http://www.sssebrno.cz/files/ovmt/tahova_zkouska.pdf
28. Střední škola strojírenská a elektrotechnická Brno. *OVMT – zkoušky tvrdosti* [online]. [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: www.sssebrno.cz/files/ovmt/zkousky_tvrdosti.pdf
29. Tediko. *NDT zkoušení* [online]. [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://www.tediko.cz/index.php?sub=02cz&lang=cz&p=0202cz>

30. Technická měřidla a počítačové systémy. *Zkušební stroje: tvrdoměry* [online]. 2012 [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://www.tempos.cz/zkusebni-stroje/tvrdomery/>
31. Učební texty vysokých škol. *Zkouška tahem: studijní opora předmětu Nauka o materiálu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu* [online]. 2002 [cit. 2014-03-07]. Dostupné z: <http://drogo.fme.vutbr.cz/opory/pdf/Tahovka.pdf>
32. Vítkovice cylinders. *Měření tvrdosti* [online]. © 2009 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.vitkovicecylinders.cz/13/cs/node/1100>
33. Zkušebna Tnc. *Mechanická zkušebna* [online]. [cit. 2014-03-06]. Dostupné z: <http://mechanicka-zkusebna.cz/tag/zkusebna-tnc/>
34. ZPS slévárna. *Tahové zkoušky statické* [online]. © 2006 [cit. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.sl.zps.cz/zkusebna1.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	Tažnost	[%]
a	Tloušťka zkušební tyče	[mm]
b	Šířka zkoušené délky ploché zkušební tyče	[mm]
D	Průměr kuličky	[mm]
D ₀	Průměr ohýbacího trnu	[mm]
d	Průměr zkoušené délky válcové tyče	[mm]
d ₀	Střední průměr vtisku	[mm]
d ₁	Průměr vtisku 1	[mm]
d ₂	Průměr vtisku 2	[mm]
E	Modul pružnosti v tahu	[MPa]
F	Působící síla	[N]
F _e	Zatížení na mezi kluzu	[N]
F _{max}	Maximální zatížení	[N]
G	Gravitační síla	[N]
HB	Tvrдость podle Brinella	[-]
HV	Tvrдость podle Vickerse	[-]
HR	Tvrдость podle Rockwella	[-]
h ₁	Výchozí výška kladiva	[m]
h ₂	Výška kladiva po přeražení	[m]
K	Nárazová práce	[J]
KC	Vrubová houževnatost	[J cm ⁻²]
L	Okamžitá délka tyče	[mm]
L _C	Zkoušená délka	[mm]
L _t	Celková délka tyče	[mm]
L _u	Měřená délka tyče po přetržení	[mm]
L ₀	Počáteční měřená délka	[mm]
l	Vzdálenost podpěr	[mm]
R	Smluvní napětí	[MPa]
R _e	Mez kluzu	[MPa]
R _{eH}	Horní mez kluzu	[MPa]
R _{eL}	Dolní mez kluzu	[MPa]
R _m	Mez pevnosti	[MPa]
R _{p0.2}	Smluvní mez kluzu	[MPa]
r	Poloměr podpěr	[mm]
S _p	Celková plocha roztaveného kovu svarového spoje	[mm ²]
S _u	Průřez krčku tyče po přetržení	[mm ²]
S _z	Celková plocha roztaveného základního materiálu	[mm ²]
S ₀	Výchozí průřez tyče	[mm ²]
S _{0V}	Počáteční průřez v místě vrubu	[mm ²]
u	Aritmetický průměr úhlopříček	[mm]
u ₁	Délka úhlopříčky 1	[mm]
u ₂	Délka úhlopříčky 2	[mm]
Z	Kontrakce	[%]
Z _{pz}	Zředění	[%]
α	Úhel ohybu	[°]
ε	Poměrná deformace	[%]
σ	Napětí	[MPa]

SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obr. 1 Zkušební vzorky.....	10
Obr. 2 Charpyho kladivo.....	10
Obr. 3 Univerzální tvrdoměr.....	10
Obr. 4 Zařízení pro zkoušku ultrazvukem.....	11
Obr. 5 Zkušební laboratoř.....	12
Obr. 6 Příklady zkušebních tyčí pro zkoušku tahem.....	13
Obr. 7 Záznam z tahové zkoušky.....	14
Obr. 8 Tahové diagramy.....	14
Obr. 9 Vzorek pro příčnou zkoušku tahem.....	15
Obr. 10 Vzorek pro podélnou zkoušku tahem.....	15
Obr. 11 Vzorek před příčnou zkouškou tahem a po zkoušce.....	17
Obr. 12 Princip zkoušky rázem v ohybu.....	18
Obr. 13 Typy vrubů.....	19
Obr. 14 Příklad značení.....	19
Obr. 15 Závislost nárazové práce na teplotě.....	21
Obr. 16 Zkouška tvrdosti podle Brinella.....	22
Obr. 17 Zkouška tvrdosti podle Vickerse.....	22
Obr. 18 Zkouška tvrdosti podle Rockwella.....	23
Obr. 19 Příklady řad vtisků.....	24
Obr. 20 Umístění vtisků na tupém svaru.....	24
Obr. 21 Příklady oblastí jednotlivých vtisků.....	25
Obr. 22 Průběh tvrdosti.....	25
Obr. 23 Průběh zkoušky ohybem a rozlomený vzorek.....	26
Obr. 24 Příčná zkouška ohýbacím trnem ze strany kořene.....	26
Obr. 25 Zkouška ohýbací kladkou.....	27
Obr. 26 „U“ přípravek pro řízené ohyby.....	27
Obr. 27 Příklady zkušebních metod pro tupé svary.....	28
Obr. 28 Příklady zkušebních metod pro koutové svary.....	28
Obr. 29 Podélný vrub.....	29
Obr. 30 Boční vrub.....	29
Obr. 31 Makrostruktura.....	30
Obr. 32 Mikrostruktura svarového spoje.....	31

SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tab. 1 Povrch tyče s vrubem kolmým k povrchu spoje.....	19
Tab. 2 Zkoušky tvrdosti.....	21

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha č. 1 - Příklad zkušebního protokolu pro příčnou zkoušku tahem
Příloha č. 2 - Provedení vrubů a jejich označení

Zkušební protokol

Číslo

Podle pWPS

Podle výsledek zkoušky „zkouška tahem“

Výsledek zkoušky „.....“

Výrobce:

Účel zkoušení:

Tvar výrobku:

Základní materiál:

Přídavný kov:

Zkušební teplota:

Tabulka A.1 – Příčná zkouška tahem podle ISO 4136

Zkušební tyč Číslo/pozice	Rozměr/ průměr mm	Maximální zátížení F_m N	Pevnost v tahu R_m N/mm ²	Místo lomu	Poznámka například vzhled lomu

Zkoušející nebo zkušební organizace

.....
(jméno, datum, podpis)

Schválil

.....
(jméno, datum, podpis)

Povrch tyče s vrubem rovnoběžným s povrchem zkušební kusu

Pojmenování	Sříd svaru	Pojmenování	Linie natavení/spoje
	Zobrazení		Zobrazení
VWS a/b		VHS a/b (tlakový svar)	
		VHS a/b (tavný svar)	

Povrch tyče s vrubem kolným k povrchu zkušební kusu

Pojmenování	Sříd svaru	Pojmenování	Linie natavení/spoje
	Zobrazení		Zobrazení
VWT 0/b		VHT 0/b	
VWT a/b		VHT a/b	
VWT 0/b		VHT a/b	
VWT a/b		VHT a/b	