

Mendelova univerzita v Brně
Institut celoživotního vzdělávání
Oddělení expertního inženýrství

**Význam nedestruktivního zkoušení v oblasti hodnocení kvality
svarů během procesu**
Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce:
doc. Ing. Michal Černý, CSc.

Vypracoval:
Bc. Miloslav Koucký

Brno 2016

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: "**Význam nedestruktivního zkoušení v oblasti hodnocení kvality svarů během procesu**" vypracoval samostatně a veškeré prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č.111/1998 Sb., o vysokých školách ve znění pozdějších předpisů a v souladu s platnou *Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací*.

Jsem si vědom, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně dne 28. 4. 2016

.....
podpis

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Michalovi Černému CSc. za odborné vedení a cenné rady, které mi věnoval při zpracování mé diplomové práce. Dále pak svým rodičům a své přítelkyni za jejich podporu po dobu mého studia.

Abstrakt

Diplomová práce „Význam nedestruktivního zkoušení v oblasti hodnocení kvality svarů během procesu“ je zaměřena na oblast vytvoření nerozebíratelného materiálového spojení svarem. V teoretické části je rozebrána oblast tavného svařování, metody tavného svařování a vady svarových spojů. Dále zhodnocení současné praxe verifikace kvality svarových spojů za pomoci nedestruktivních zkoušek. V experimentální části diplomové práce je navržena progresivní zkouška pro hodnocení kvality provedení svaru z pohledu vytvoření expertního posudku. Navržená metoda hodnocení provedení svarů je dále ověřena experimentálně a získané výsledky z provedeného měření jsou konfrontovány se stávající metodou určování kvality svaru. V závěrečné části diplomové práce je provedeno ekonomické zhodnocení přínosu navržené metodiky a její začlenění do kvalifikace expertního inženýra.

Klíčová slova

svařování, vady svarů, nedestruktivní zkoušky, akustická emise

Abstract

The diploma thesis “The significance of nondestructive testing in the area of evaluation of the welds quality during the process” is focused on the area of creating a material weld joint that cannot be disassembled. In the theoretical part the area of fusion welding, methods of fusion welding and defects of weld joints are analysed. Assessment of current practice of verification of the weld joint quality using nondestructive testing is analysed, too. In the experimental part of the diploma thesis progressive examination for assessing the weld joint quality is suggested from the view of making an expert assessment. The suggested method of evaluating the making of welds is also verified in an experimental way and the gained results of the performed measurement are compared with the existing method of determining the weld quality. In the final part of the diploma thesis economical assessment of the benefit of the suggested method and its incorporation into the qualification of an expert engineer is carried out.

Keywords

welding, weld defects, nondestructive testing, acoustic emission

Obsah

1. ÚVOD.....	8
2. CÍL PRÁCE A METODIKA	9
3. LITERÁRNÍ REŠERŠE	10
3.1. Svařování.....	10
3.1.1. Svařitelnost	10
3.1.2. Teplotní cyklus svařování	11
3.1.3. Vznik a tvorba svaru	12
3.1.3.1. Svarový kov	12
3.1.3.2. Tepelně ovlivněná oblast svarového spoje (TOO).....	14
3.2. Metody svařování.....	15
3.3. Tavné svařování kovů.....	16
3.3.1. Svařování plamenem.....	16
3.3.2. Svařování elektrickým obloukem	18
3.3.2.1. Svařování obalenou elektrodou	18
3.3.3. Obloukové svařování v ochranných plynech.....	20
3.3.3.1. Svařování metodami MIG, MAG, MAG/CO ₂	20
3.3.3.2. Svařování metodou WIG (TIG)	21
3.4. Vady svarových spojů.....	23
3.4.1. Rozdělení vad svarů	23
3.4.2. Příčiny vzniku vad	24
3.4.3. Hodnocení vad	27
3.5. Zkoušky svarů.....	27
3.5.1. Destruktivní zkoušky	28
3.5.2. Nedestruktivní zkoušky	28
3.5.2.1. Vizuální zkouška	29
3.5.2.2. Zkouška penetrační - kapilární	30
3.5.2.3. Zkouška magnetická prášková	31
3.5.2.4. Zkouška ultrazvuková.....	32
3.5.2.5. Zkouška prozářením (RTG)	33
3.6. Akustická emise.....	35
3.6.1. Zdroj a událost akustické emise	36

3.6.2.	Měření akustické emise	36
3.6.3.	Intenzita událostí akustické emise	37
3.6.4.	Využití akustické emise jako NDT metody v praxi.....	38
4.	EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST.....	39
4.1.	Návrh zkoušky pro hodnocení kvality svarů během procesu svařování	39
4.1.1.	Materiál pro svařování	39
4.1.2.	Zařízení pro měření AE.....	41
4.1.3.	Svařování.....	42
4.2.	Zkouška pro hodnocení kvality svarů během procesu svařování	42
4.2.1.	Svařování a měření záznamu AE	42
4.2.1.	Naměřená data AE	46
4.2.1.1.	Záznamy akustické emise na vzorcích z materiálu S235JRC	46
4.2.1.2.	Záznamy akustické emise na vzorcích z materiálu 90MnCrV8.....	48
4.2.2.	Pevnostní verifikace	49
4.2.3.	Materiálová verifikace.....	51
5.	DISKUZE.....	53
5.1.	Diskuse experimentálních výsledků	53
5.2.	Přínos AE v praxi expertního inženýra	58
6.	ZÁVĚR	59
7.	SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	60
8.	SEZNAM OBRÁZKŮ	62
9.	SEZNAM TABULEK	64

1. ÚVOD

Svařování je technologie, kterou se za pomoci materiálového styku vytváří trvalé a nerozebíratelné spojení dvou nebo více součástí. Svarový spoj vzniká působením tepla, tlaku nebo kombinací tepla a tlaku. Svařováním lze spojovat kovové i nekovové materiály, materiály, které mají podobné i různé vlastnosti. Důležitými faktory pro vznik kvalitního svarového spoje jsou odpovídající volba metody svařování či správný technologický postup pro různé typy materiálů a konstrukcí.

Historicky se počátky svařování a vzniku prvních svarových spojů datují do doby asi 2000 let před naším letopočtem, kdy se jednalo o tzv. kovářské svary. Kovářské svary se historicky objevovaly celá staletí až do 19. století, kdy byl vynalezen elektrický oblouk, objevena výroba acetylénu a elektrický generátor. V tomto období se rozšířilo i svařování a řezání plamenem a svařování uhlíkovou elektrodou. Dominantními způsoby svařování se na přelomu 19. a 20. století staly svařování plamenem a obloukové svařování. Velmi rychlý vývoj metod svařování nastal především v průběhu první a druhé světové války. Ve druhé polovině 20. století byly vyvinuty metody svařování využívající elektronový paprsek, laser či plasmu. Mezi nejnovější z metod svařování patří metoda třecího svařování promíšením, která byla vyvinuta v 90. letech 20. století. (Kraus, 2014)

V současné době jsou kladeny velké nároky na kvalitu, spolehlivost a bezpečnost konstrukcí a výrobků se svarovými spoji. Z tohoto důvodu byly a stále ve větší míře jsou tyto konstrukce a výrobky podrobovány zkouškám svarových spojů. Zkoušky svarových spojů lze rozdělit na zkoušky destruktivní, kdy dochází při průběhu zkoušky k poškození svaru a zkoušky nedestruktivní, jejichž velkou výhodou je, že po ukončení dané zkoušky je možno výrobek použít.

Modernější nedestruktivní kontrola svarových spojů má tedy stále častěji nezastupitelnou roli v kontrole a řízení jakosti v mnoha firmách. Charakteristickým znakem nedestruktivního zkoušení v 21. století je především propojení znalostí z oblasti materiálů, technologií svařování, elektroniky a výpočetní techniky.

Hlavním účelem nedestruktivního zkoušení v 21. století je zajištění vytvoření výrobků bez vad, v dané kvalitě a dle daných norem a s tím spojené předcházení selhání výrobků vlivem poruch, předcházení úrazům a ochraně lidských životů, zajištění spokojenosti zákazníka a udržení dobré pověsti výrobce díky garanci spolehlivosti a úrovně kvality daného výrobku.

2. CÍL PRÁCE A METODIKA

Cílem diplomové práce na téma „Význam nedestruktivního zkoušení v oblasti hodnocení kvality svarů během procesu“ je vytvoření rešerše z oblasti vytvoření nerozebíratelného materiálového spojení svarem. Zaměřit se především na oblast tavného svařování, na metody tavného svařování a vady svarových spojů. Dále zhodnocení současné praxe verifikace kvality svarových spojů a to především za pomoci nedestruktivních zkoušek.

Cílem experimentální části diplomové práce je navržení progresivní zkoušky pro hodnocení kvality provedení svarů z pohledu vytvoření expertního posudku a následné praktické ověření navržené metody hodnocení provedení svaru s ohledem na jeho předpokládané vlastnosti. Získané výsledky z provedeného měření konfrontovat se stávající metodou určování kvality svaru.

V závěrečné části diplomové práce provést ekonomické zhodnocení přínosu navržené metodiky a její začlenění do kvalifikace expertního inženýra.

3. LITERÁRNÍ REŠERŠE

3.1. Svařování

Svařování je proces, který slouží k vytvoření nerozebíratelného a trvalého spoje dvou a více materiálů. Obecným požadavkem na proces svařování je vytvoření takových termodynamických podmínek, při kterých je umožněn vznik nových meziatomárních vazeb. (Kolektiv autorů při ISS Čeb, 2010)

Vzhledem k tomu, že je velmi obtížné dosáhnout spojení na úrovni meziatomových vazeb za okolních podmínek (běžného tlaku a teploty), kdy je termodynamický stav materiálů stabilní, resp. metastabilní, je nutné tento termodynamický stav změnit. Proto je při svařování nutné působit tlakem, teplem nebo oběma faktory zároveň. Obecnou závislostí je, že čím vyšší působí tlak, tím méně je potřeba vnést tepla a obráceně. Svařovat lze kovové i nekovové materiály, materiály podobných i různých vlastností. Ovšem pro různé typy spojů a materiálů jsou vhodné jiné metody svařování. Při svařování dochází vždy ke změně fyzikálních nebo mechanických vlastností základního materiálu (spojovaného) v okolí spoje. (Kolektiv autorů při ISS Čeb, 2010)

Svařováním kovů a jejich slitin vznikají nerozebíratelné spojení pomocí soustředěného tepla nebo tlaku, případně obojím s použitím, nebo bez použití přídavného materiálu, stejného nebo podobného chemického složení jako spojovaných materiálů. Spojení nastane působením meziatomových sil, vazeb na teple nebo tlakem aktivovaných plochách, které jsou v oblasti svařování v roztaveném nebo plastickém stavu. (Ambrož a kol., 2001)

3.1.1. Svařitelnost

Je technologickou vlastností materiálů. Je to komplexní charakteristika materiálu, která určuje za jakých daných podmínek je či není materiál vhodný pro svařované spoje předepsané jakosti. (Koukal, 2005)

Svařitelnost materiálů je ovlivňována velkým množstvím aspektů, mezi které lze zařadit vlastnosti základního svařovaného materiálu a svarového kovu, kterými jsou např. chemické složení, mechanické vlastnosti, mikrostruktura, absorpce plynů či vlastnosti a chování za vysokých teplot aj. Mezi další aspekty ovlivňující svařitelnost materiálů patří použitá metoda svařování a výrobní podmínky (tavné či tlakové svařování, parametry svařování, množství tepla vneseného do svarového spoje či dokonalost ochrany místa svaru). Svařitelnost materiálů je ovlivněna také konstrukcí svařence, počtem a typem svarů použitých na konstrukci, zbytkových napětích nebo deformacích svařence. (Koukal, 2005)

Kovový materiál se považuje za svařitelný do určitého stupně při daném způsobu svařování a pro daný účel, pokud je možné v dané situaci za použití odpovídajícího technologického postupu svařování dosáhnout celistvosti svarových spojů tak, že tyto spoje vyhovují technickým požadavkům, které se týkají vlastností spojů samotných i jejich vlivu na konstrukční celek, jehož součástí spoje jsou. (Koukal, 2005)

Druhy svařitelnosti:

- tavná
- odporová - tlaková

Tavná svařitelnost závisí na chemickém složení, způsobu výroby, tepelném zpracování a tloušťce svařovaného materiálu. Dle ČSN 051310 lze rozdělit oceli z hlediska svařitelnosti do čtyř klasifikačních stupňů, na oceli se svařitelností zaručenou, podmíněnou, dobrou a obtížnou (tab. 1.) (Kubíček, 2013)

Tab. 1: Skupiny tavné svařitelnosti (Kubíček, 2013)

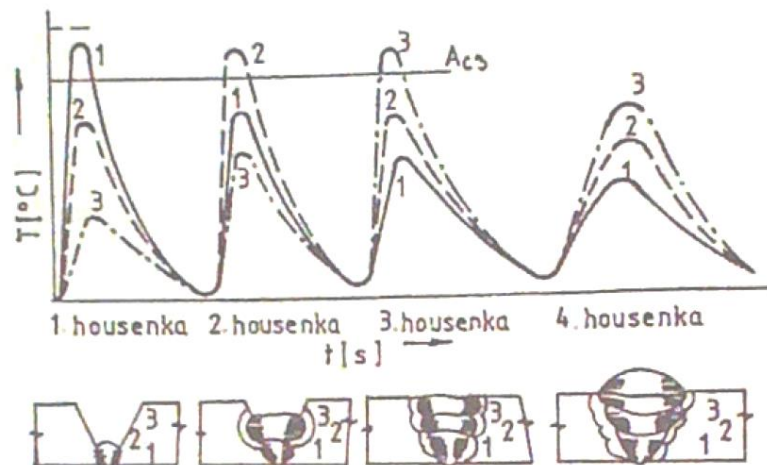
Stupeň svařitelnosti	Označení	Rozsah záruky	Příklad použití
Zaručená	1a	zaručuje svařitelnost při svařování za okolních teplot až 0°C	pro dynamicky namáhané svarky i při nižších venkovních teplotách
Podmíněně zaručená	1b	zaručuje svařitelnost při dodržení předem určených podmínek uvedených v normě jakosti oceli	pro svarky staticky namáhané
Dobrá	2	nezaručuje svařitelnost, ale tyto oceli dávají ve většině případů vyhovující svarové spoje	na podřadné, staticky namáhané konstrukce; na opravy
Obtížná	3	nelze zpravidla dosáhnout vyhovující jakosti svarových spojů ani při dodržení zvláštních opatření při svařování	nedoporučuje se používat na svařování, jen na nutné opravy

3.1.2. Teplotní cyklus svařování

Působením soustředěného zdroje tepla dochází při procesu svařování krátkodobě k intenzivnímu místnímu ohřevu materiálu na vysoké teploty. Malý objem kovu je natavován vneseným teplem a v důsledku tepelné vodivosti je ohřívána i okolní oblast základního materiálu. (Koukal, 2005)

Vysoké teploty a změny těchto teplot v základním materiálu způsobují při svařování fázové přeměny - tavení základního a přídavného materiálu, tuhnutí a změny v tuhém stavu, změny struktury v oblasti svarového spoje, změny objemu, které způsobují vnitřní napětí a deformace ve svarovém spoji a další fyzikálně chemické reakce. Rozsah a množství těchto změn je závislé především na chemickém složení, fyzikálních vlastnostech a geometrických rozměrech základního materiálu, nastavených parametrech a postupu při dané metodě svařování a množství tepla vneseného do svarového spoje na jednotku jeho délky. (Koukal, 2005)

Teplotní cyklus svařování udává změnu teploty v závislosti na čase v daném bodě svarového spoje a to především v tepelně ovlivněné oblasti. Důsledkem působení teplotního cyklu na materiál je změna struktury a vlastností daného materiálu. Na základě charakteristik teplotního cyklu, kterými jsou čas ohřevu na maximální teplotu, nebo rychlost ohřevu, dále maximální teplota cyklu, doba výdrže na dané teplotě či rychlost ochlazování, je možné hodnotit velikost a charakter změn. (Koukal, 2005)



Obr. 1: Průběh teplotních cyklů čtyřvrstvého svaru (Koukal, 2005)

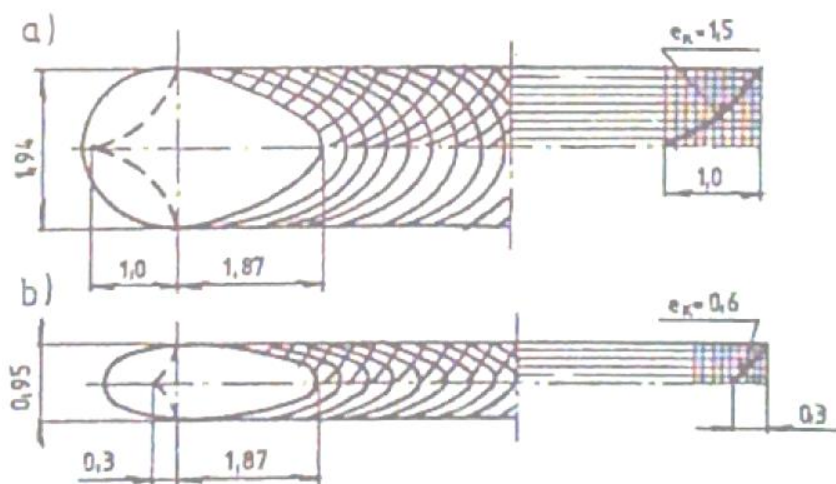
3.1.3. Vznik a tvorba svaru

Svařením dvou nebo více dílců v jeden celek se zhotoví výrobek, dle normy ČSN 05 0000 označován jako **svarek**.

3.1.3.1. Svarový kov

Svarový kov vzniká tavením základního a přídavného materiálu. Podíl nataveného základního materiálu ve svarovém kovu se nazývá stupeň promísení. Při ručním obloukovém svařování je stupeň promísení od 10 do 40 %, při elektrostruskovém svařování až 90 %. Při svařování elektronovým paprskem je svarový kov tvořen pouze nataveným základním materiálem. (Koukal, 2005)

Velikost a tvar svarové lázně, tedy její objem, je přímo úměrný tepelnému příkonu svařování. Geometrické faktory svarové lázně, šířka a hloubka jsou nejvýznamněji ovlivňovány intenzitou svařovacího proudu a svařovacím napětím. Tvar svarové lázně ovlivňuje také rychlost svařování. (Koukal, 2005)



Obr. 2: Tvar svarové lázně a směr růstu dendritů:

a) při malé rychlosti svařování

b) při velké rychlosti svařování (Koukal, 2005)

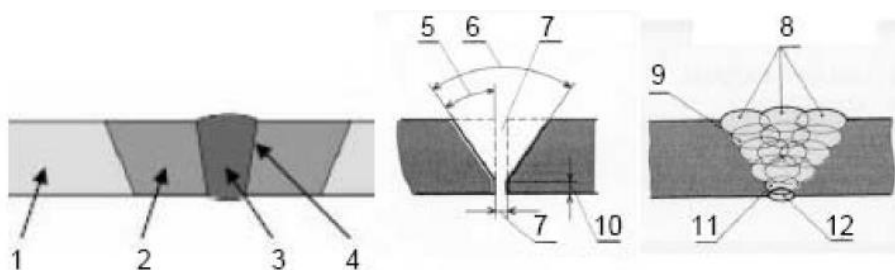
Nejdůležitějšími vlastnostmi svarového kovu jsou dostatečná pevnost a houževnatost. Svarový kov může být v celém objemu svarové mezery vytavený naráz (svařování elektrickým odporem) nebo může být vytavený po jednotlivých vrstvách (houseskách). (Hrivňák, 2009)

Při poklesu teploty svarového kovu pod teplotu likvidu začíná krystalizace svaru. V závislosti na chemickém složení svarového kovu a rychlosti svařování krystalizuje svarový kov celulárně nebo dendriticky. Celulární krystalizace probíhá při menším podchlazení a nemá přednostní krystalografickou orientaci. Dendritická krystalizace probíhá při větším podchlazení, kdy dendrity rostou přednostně ve směru maximálního teplotního gradientu. (Koukal, 2005)

Krystalizace svarových spojů začíná u většiny svarů růstem dendritů a v určitém stádiu se mění na celulární. Volbou vhodných parametrů svařování a pulsací svařovacího proudu lze zajistit zvýšení objemu celulární krystalizace. Mikrostruktura svarového kovu závisí na chemickém složení a svařovacích parametrech. Vlastnosti svarových kovů výrazně ovlivňuje typ mikrostruktury, velikost zrn nebo stárnutí. (Koukal, 2005)

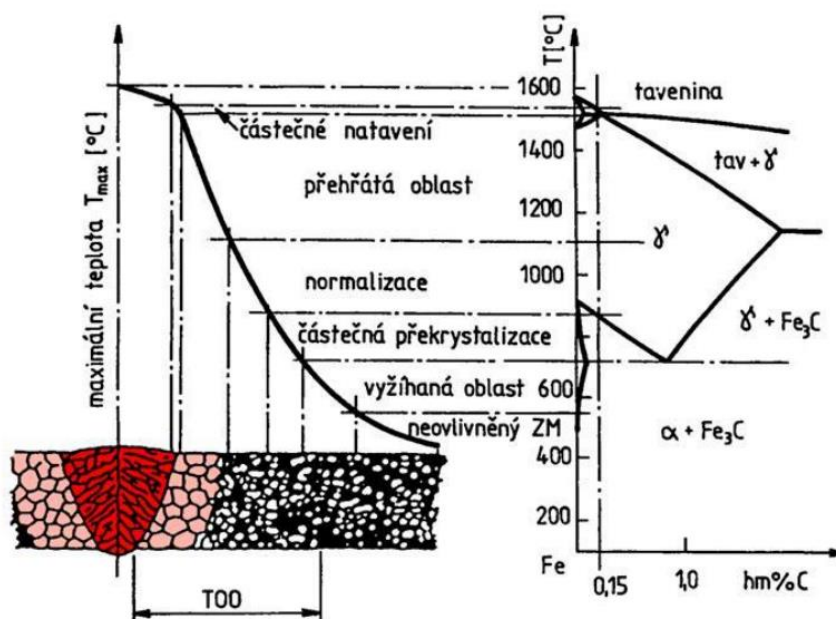
3.1.3.2. Tepelně ovlivněná oblast svarového spoje (TOO)

Svařování je proces, při kterém dochází ke vzniku spoje vzájemným spojením dvou materiálů. Natavená část je označována jako svarový kov a část, která byla ovlivněna teplem svaru, jako tepelně ovlivněná oblast. Přechod mezi nimi je označován jako přechodová zóna. (Hrivňák, 2009)



Obr. 3: Části svarového spoje a jejich názvy: 1 - základní materiál; 2 - tepelně ovlivněná oblast; 3 - svarový kov; 4 - přechodová zóna; 5 - úhel zkosení; 6 - úhel rozevření; 7 - svarová mezera; 8 - krycí vrstva; 9 - housenka; 10 - otupení v kořeni; 11 - kořenová vrstva; 12 - podložení kořene (Hrivňák, 2009)

Tepelně ovlivněnou oblast se nazývá oblast svarového spoje, ve které dochází ke změnám mikrostruktury v důsledku působení zdroje tepla při svařování. Při svařování kovů a slitin bez polymorfni přeměny (Al, Cu, Ni) nedochází ke změně mikrostruktury. V kovech a slitinách s polymorfni přeměnou (oceli) dochází k výrazným strukturálním změnám. Tyto změny mají podstatný vliv na vlastnosti svarových spojů. Při svařování nelegovaných a případně legovaných ocelí s polymorfni přeměnou lze rozdělit tepelně ovlivněnou oblast na charakteristická pásma. (Koukal, 2005)



Obr. 4: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje (Koukal, 2005)

Pásmo částečného natavení - přechod z TOO do svarového kovu, tato oblast se většinou redukuje na linii nazývané hranice ztavení

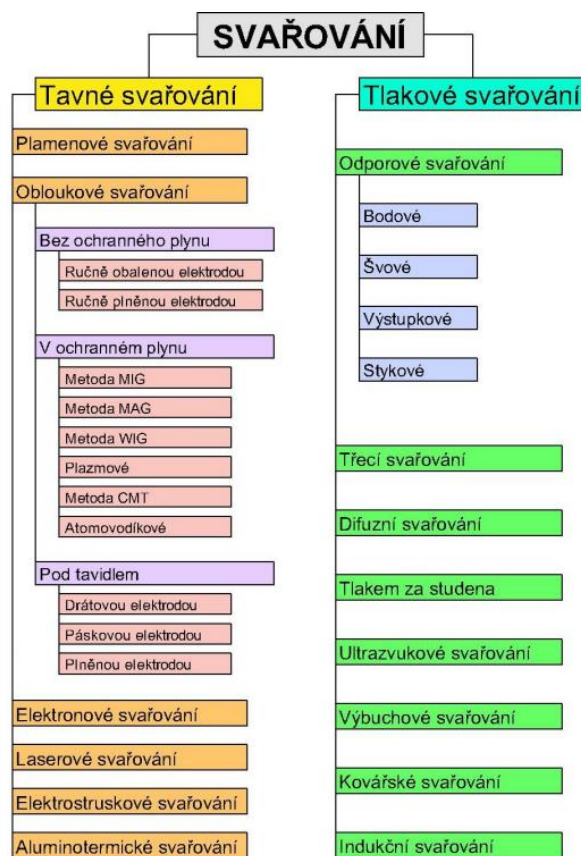
Pásmo přehřátí - oblast překračující teplotu intenzivního růstu primárních zrn, tzv. teplotu přehřátí

Pásmo normalizace - definováno teplotami A_3 a teplotou přehřátí s úplnou transformací

Pásmo částečné překrystalizace - v rozmezí teplot A_1 až A_3 s neúplnou polymorfni přeměnou (Koukal, 2005)

Šířka oblastí tepelně ovlivněné oblasti je rozdílná pro různé metody svařování a je podstatně ovlivněna svařovacími parametry. V průběhu svařování většinou metod dochází k růstu zrn v pásmu přehřátí. Míra růstu zrn je závislá na chemickém složení oceli a na teplotním ovlivnění. Zhrubnuté zrno ovlivňuje vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti. Možným důsledkem zhrubnutí zrna je zhoršení plasticity, zvýšení náchylnosti k praskání, snížení pevnosti či snížení odolnosti proti korozi. (Koukal, 2005)

3.2. Metody svařování



Obr. 5: Rozdělení metod svařování kovů (Polák, 2013)

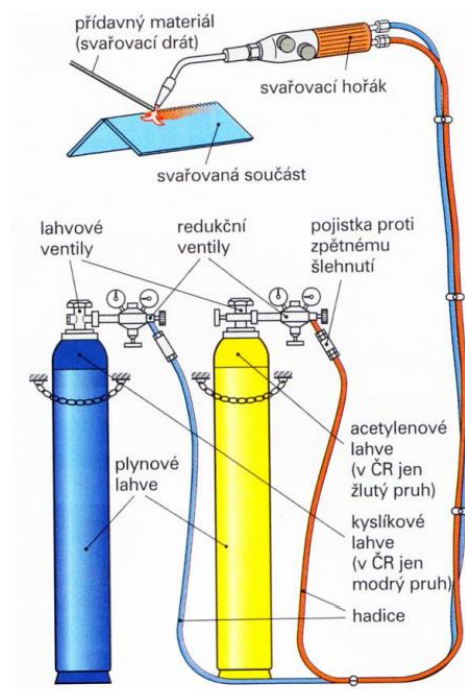
3.3. Tavné svařování kovů

Při tavném svařování dochází ke spojení místním natavením svarových ploch základních materiálů bez použití tlaku nebo rázů. Ve většině případů se při tavném svařování používá přídavný materiál stejného nebo podobného chemického složení jako má základní materiál. Roztavený materiál tvoří tavnou lázeň. (Beneš, 2013)

Při tavném svařování tedy dochází k natavení svarových ploch působením tepla a následnému promísení základního kovu s roztaveným přídavným materiálem. Poté dochází k vytvoření kořene svaru, na který se postupně kladou další housenky, dokud se nevyplní celý průřez svaru svarovým kovem spoje, dochází k vytvoření tzv. závaru. (Beneš, 2013)

3.3.1. Svařování plamenem

Svařování plamenem se vyznačuje dlouhou tradicí, nejvyužívanějším způsobem svařování bylo až do třicátých let minulého století. Svařování plamenem má široké použití při svařování všech běžných konstrukčních materiálů. (Kulhánek a kol., 2010)



Obr. 6: Zařízení pro svařování plamenem (Hlaváček, 2013)

Zdrojem tepla při svařování plamenem je chemická energie hoření plamene, ten vzniká hořením směsi hořlavého a oxidujícího plynu. Parametry zdroje tepla - plamene se řídí použitými plyny. Oxidující plyn se přivádí ze zdroje do hořáku. Smíšením obou plynů vzniká směs, která se u výstupu z hořáku zapálí a vzniká plamen. (Ambrož a kol. 2001)

Typy plamene

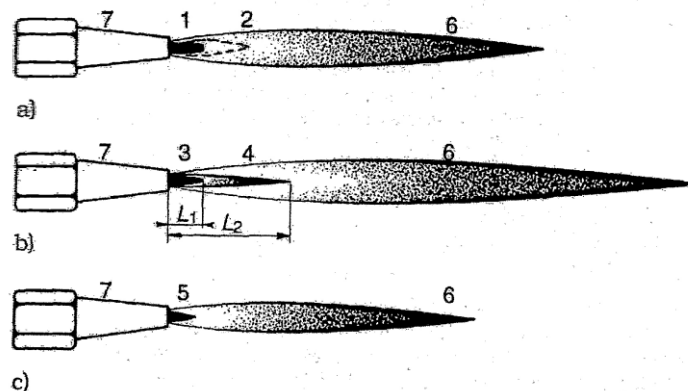
Parametry plamene výrazně ovlivňuje poměr kyslíku a hořlavého plynu ve směsi. U všech hořlavých plynů, s výjimkou acetyleny se jedná o plamen oxidační. Každý hořlavý plyn má jiný směsný poměr (poměr kyslíku a hořlavého plynu). V případě acetyleny je tento poměr 1,1 a např. u vodíku 0,4.

Plamen kyslíko - acetylenový je hlavním představitelem plamene pro technologické užití a dělí se:

Podle poměru kyslíku a acetyleny:

- a) *Neutrální* - svařovací plamen je ostře ohraničen a září oslnivě bíle, obvykle se jím svařují oceli
- b) *Redukční* - s přebytkem acetyleny, používá se pro svařování hliníku, hořčíku a jejich slitin k navařování tvrdokovů a k cementování plamenem
- c) *Oxidační* - s přebytkem kyslíku, používá se pro svařování mosazi a bronzů

(Ambrož a kol. 2001)



Obr. 7: Rozdělení kyslíko - acetylenového plamene dle poměru acetyleny a kyslíku (Ambrož a kol. 2001)

3.3.2. Svařování elektrickým obloukem

Svařování elektrickým obloukem patří mezi nejvýznamnější a nejpoužívanější metody svařování. Obloukové svařování je skupina metod tavného svařování, u kterých je energie potřebná k roztavení svařovaných ploch dodávána jako teplo vzniklé při hoření elektrického oblouku. V technické praxi patří mezi nejrozšířenější díky vysoké míře reprodukovatelnosti, relativně nízkým investičním nákladům a díky dosahované kvalitě svarových spojů. (Kulhánek a kol., 2010)

Svařování elektrickým obloukem patří mezi technologie tavného svařování, při kterém se využívá teplo elektrického oblouku. Vysoká teplota oblouku zajišťuje koncentrování velkého množství tepla v malém prostoru a to je důsledkem rychlého natavení svarových ploch základního materiálu a natavení přídavného materiálu. (Ambrož a kol. 2001)

Svařovací oblouk

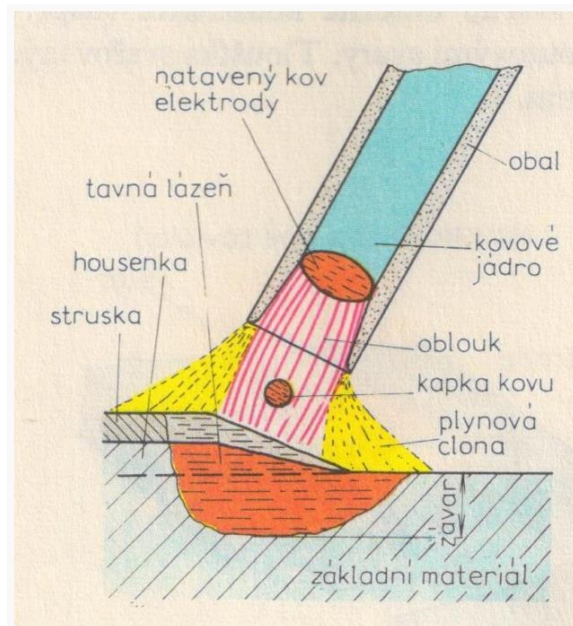
Elektrický oblouk je nízkonapěťový elektrický vysokotlaký výboj o dostatečné proudové hustotě, který je veden v prostředí ionizovaného plynu. Při svařování se napětí na oblouku pohybuje v rozmezí 10 až 50 V, proud v rozmezí 10 až 2000 A. Stabilita elektrického oblouku vyžaduje dostatečné napětí pro ionizaci daného prostředí a proud, který plazma oblouku udrží v ionizovaném stavu. (Kulhánek a kol., 2010)

Zdroje proudu pro svařování obloukem

Zdroje svařovacího proudu dodávají potřebnou elektrickou energii pro zapálení a stabilní hoření elektrického oblouku tzn., že dodávají do uzavřeného svařovacího obvodu elektrický proud požadovaných vlastností pro danou metodu svařování. Při svařování elektrickým obloukem se používá proud stejnosměrný a střídavý. (Ambrož a kol., 2001)

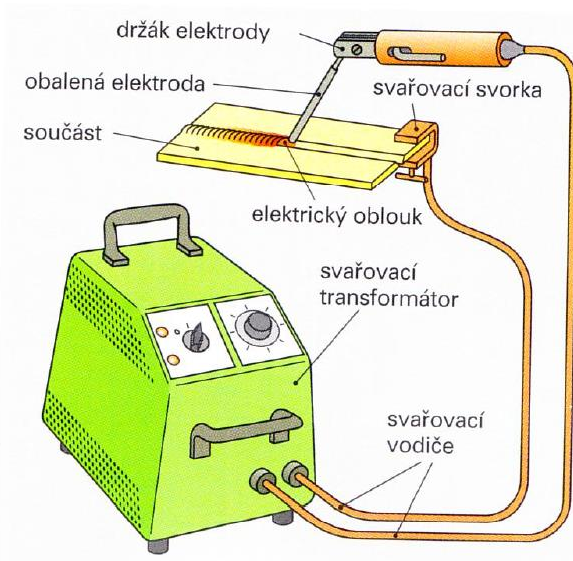
3.3.2.1. Svařování obalenou elektrodou

Patří mezi nejstarší a nejrozšířenější způsoby obloukového svařování. Při svařování obalenou elektrodou oblouk hoří mezi základním materiálem a kovovou obalenou elektrodou, která se odtavuje a poskytuje tak přídavný materiál. Svařovací proud může být stejnosměrný s přímou či obrácenou polaritou, popřípadě střídavý. K výhodám metody svařování obalenou elektrodou patří jednoduchost a nenáročnost, velký výběr přídavných materiálů a také univerzálnost. Touto metodou lze při použití mobilních zdrojů svařovat prakticky kdekoliv v terénu. (Hrivňák, 2009)



Obr. 8: Průřez obalenou elektrodou (www.eluc.kr-olomoucky.cz)

Teplem elektrického oblouku se taví svařovaný materiál, kovové jádro elektrody i její obal. Struska vytvořená z obalu chrání odtavovanou kapku kovu před škodlivými účinky vzduchu tím, že kapku kovu obaluje a také tvoří plynovou clonu, která zabraňuje přístupu vzduchu ke kapkám kovu. Struska zpomaluje rychlost ochlazování, eliminuje vznik teplotních prnutí a s tím spojených deformací materiálu. Svařuje se nejčastěji ručně ve všech polohách, protože oblouk má na tavnou část přímý vliv. Proud je volen podle charakteru práce a průměru elektrody. Jako zdroj proudu se používají rotační svářečky, usměrňovače a transformátory. (Beneš, 2013)



Obr. 9: Svařovací zařízení pro svařování obalenou elektrodou (Hlaváček, 2013)

3.3.3. Obloukové svařování v ochranných plynech

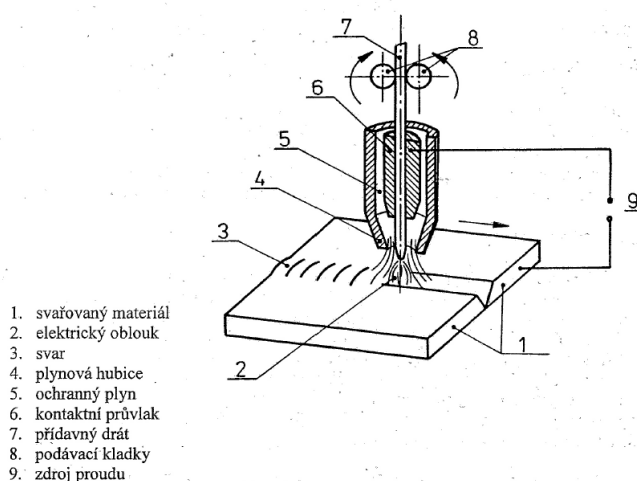
Při obloukovém svařování v ochranném plynu hoří oblouk obklopen ochranným plynem, jehož primárním úkolem je ochrana elektrody, oblouku, odtavující se kapky přídavného materiálu a tavné lázně proti účinkům vzdušného kyslíku a dusíku. Technologie se rozlišují podle druhu použitého ochranného plynu a druhu elektrody. (Ambrož a kol., 2001)

Základní a mezinárodně uznávané zkratky označující metody obloukového svařování v ochranných plynech (Ambrož a kol., 2001):

- **MAG** - *Metal Activ Gas* - svařování tavící se kovovou elektrodou v aktivním plynu
- **MIG** - *Metal Inert Gas* - svařování tavící se kovovou elektrodou v inertním plynu
- **WIG** - *Wolfram Inert Gas* - svařování netavící se wolframovou elektrodou v inertním plynu (označována TIG - Tungsten Inert Gas)

3.3.3.1. Svařování metodami MIG, MAG, MAG/CO₂

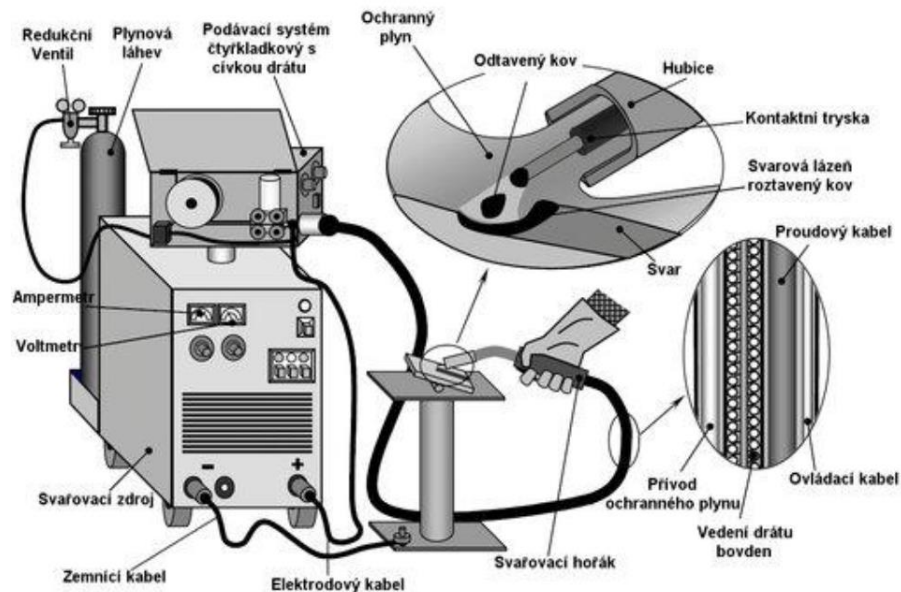
Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně aktivního plynu MAG patří v celosvětovém měřítku k nejpoužívanějším metodám svařování nelegovaných a nízko-
legovaných ocelí. Obloukové svařování tavící se elektrodou v ochraně inertního plynu MIG je velmi důležitou metodou v celosvětovém měřítku vlivem růstu objemu svařování hliníkových slitin. Metoda MAG/CO₂ je metodou provozně nejlevnější, výkon odtavení je podstatně vyšší než u svařování obalenou elektrodou a má velké využití v oblasti konstrukčních svarů. Hlavními klady těchto metod je velký výběr přídavných materiálů a ochranných plynů, snadná možnost mechanizace a robotizace atd. (Ambrož a kol., 2001)



Obr. 10: Princip svařování tavící se elektrodou MIG/MAG (Ambrož a kol., 2001)

Svařování těmito metodami je založeno na principu hoření oblouku mezi tavící se elektrodou ve formě drátu a základním materiálem v ochranné atmosféře inertního nebo aktivního plynu. Přídavným materiálem je drát o malém průměru, který se odvíjí ze zásobníku a je veden do svařovacího hořáku. Napájení drátu elektrickým proudem je zajištěno třecím kontaktem v ústí hořáku tak, aby elektricky zatížená část drátu byla co nejkratší. (Ambrož a kol., 2001)

Na ochranu oblouku se používají jednosložkové nebo vícesložkové plyny. Jejich hlavním úkolem je zamezit přístupu vzduchu do oblasti svařování tzn. chránit elektrodu, oblouk i tavnou lázeň, její okolí i kořen svaru před účinky vzdušného kyslíku (způsobuje oxidaci, naplynění, pórovitost aj.). Podle charakteru se ochranné plyny projevují neutrálním, oxidačním nebo nauhličujícím vlivem na svarovou lázeň. V minulosti se používaly jednosložkové plyny (ekonomicky výhodný CO_2), v současnosti jsou rozšířené směsi argonu s oxidem uhličitým nebo kyslíkem. (Ambrož a kol., 2001)

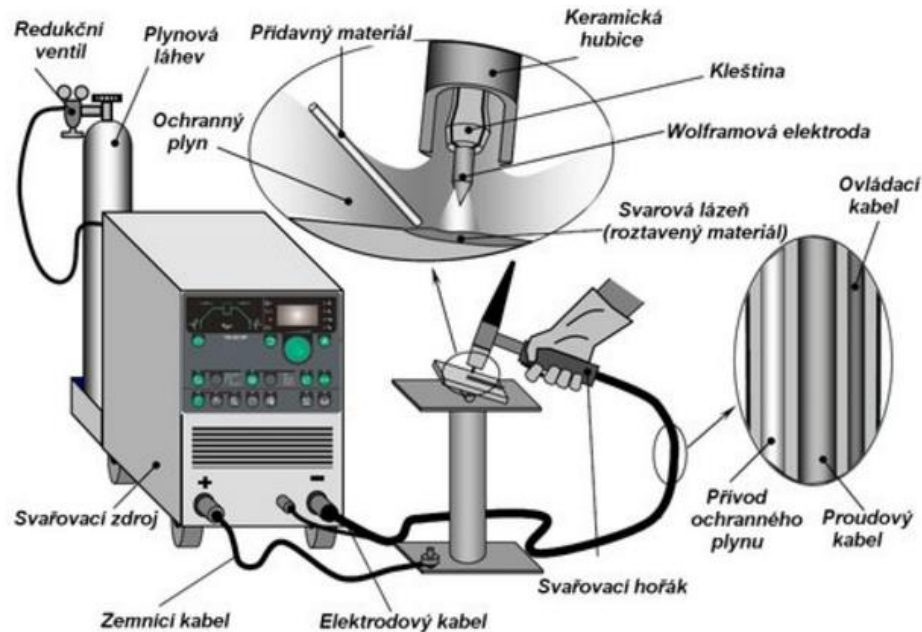


Obr. 11: MIG/MAG - Svařovací zařízení (www.automig.cz)

3.3.3.2. Svařování metodou WIG (TIG)

Při svařování metodou WIG hoří oblouk mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, je chráněn inertním plynem, především argonem, méně často heliem, dusíkem, nebo směsnými plyny Ar - He. Tento plyn chrání svarový kov před přístupem vzduchu a zvyšuje stabilitu elektrického oblouku. (Beneš, 2013)

Touto metodou se svařuje zpravidla ručně, střídavým napětím (hliník, hořčík a jejich slitiny) nebo stejnosměrným proudem (ocel, měď, titan a jejich slitiny). Tenké plechy je možno touto metodou svařovat bez přídavného materiálu, materiály větší tloušťky s materiálem přídavným stejného složení, jako je materiál základní. Přídavný materiál je do svařovacího oblouku přiváděn ručně nebo podavačem drátu. (Beneš, 2013)



Obr. 12: TIG/WIG - Svařovací zařízení (www.automig.cz)

Při svařování metodou WIG je wolframová elektroda upnuta pomocí kleštiny v hlavici hořáku. Pomocí kleštiny je do elektrody přenášen také svařovací proud. Hořáky jsou jednoduché a nenáročné, pro nižší výkony bývají chlazeny plynem, pro vyšší proudy bývají chlazeny vodou. Hořák je dále opatřen hubicí, kterou ven proudí plyn tvořící v místě svařování inertní ochrannou atmosféru. Ochranný plyn musí mít předepsanou čistotu a proudit kolem elektrody vhodnou rychlostí. (www.svarinfo.cz, 2009)

Kvalitu svarového spoje zhoršuje nedostatečné množství plynu i nadměrná rychlost proudění plynu. Wolframová elektroda obsahuje často přísadu kysličníku thoria, tato přísada napomáhá při ochlazování elektrody. Inertní atmosféra chrání tavnou lázeň před přístupem vzduchu a usnadňuje zapalování oblouku. Zabroušením konce elektrody do ostrého hrotu je dosaženo jeho klidnějšího hoření, oblouk je lépe soustředěn a hloubka závaru je vyšší. (www.svarinfo.cz, 2009)

3.4. Vady svarových spojů

Vadou výrobku se obecně rozumí každá odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami, případně smluvním vzorkem.

3.4.1. Rozdělení vad svarů

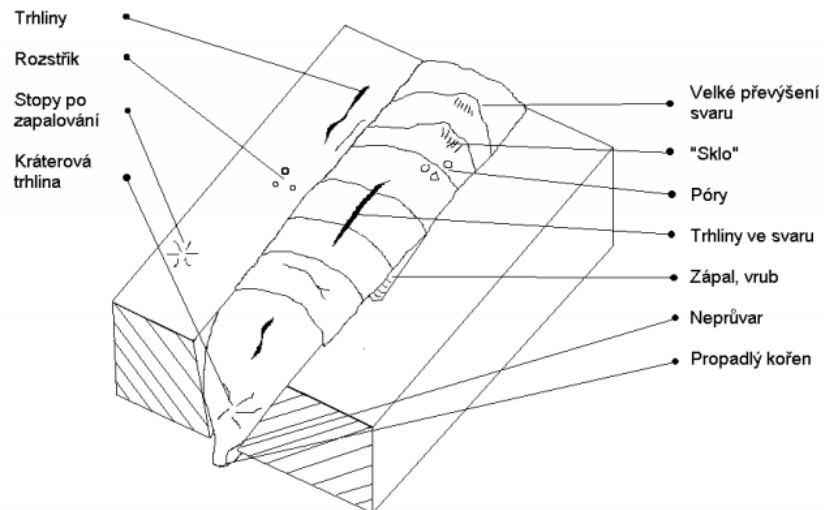
Vady, které se vyskytující ve svarových spojích a návarech lze rozdělit do dvou hlavních skupin a to na vady **plošné** a **objemové**. Do vad plošných lze zařadit trhliny, neprůvary a studené spoje, do vad objemových vznik pórů, bublin, kovových i nekovových vměstků, zápaly, nedodržení rozměrů a nepravidelnost povrchu svaru. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Podle polohy vady ve svaru:

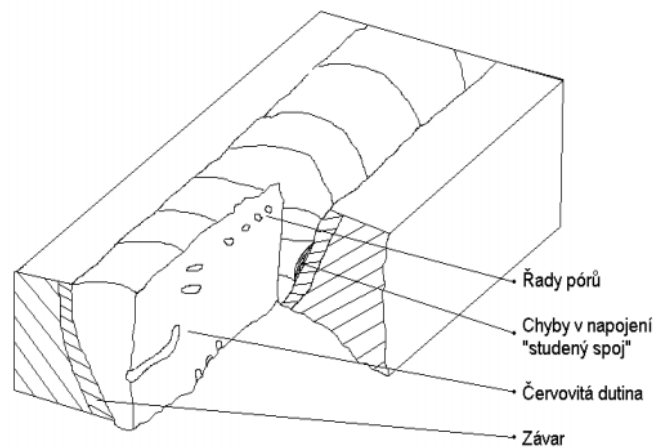
- a) *povrchové* - nacházející se na povrchu svaru
- b) *vnitřní* - nacházející se pod povrchem svaru a nevystupující na povrch svaru

Podle charakteru dle normy ČSN EN ISO 6520-1:

- a) *trhliny* - podélné, příčné, nespojitě aj.
- b) *dutiny* - póry, bubliny, staženiny - vyskytující se ve shlucích či jednotlivě
- c) *vměstky* - struskové, tavidlové, kovové aj.
- d) *studený spoj* - ve spoji není kovová vazba, materiál nebyl nataven; *neprůvar*; *neprovařený kořen* (jedna nebo dvě strany svarové plochy kořene nejsou nataveny)
- e) *vady tvaru a rozměrů* - zápaly, vruby v kořeni, vadné napojení, nadměrné převýšení svaru aj.
- f) *různé vady* - rozstřík, vada stehu, brusné stopy aj. (Technologie 1 ČVUT, 2005)



Obr. 13: Povrchové (viditelné) vady svarů (Dula, 2012)



Obr. 14: Vnitřní vady svarů (Dula, 2012)

3.4.2. Příčiny vzniku vad

1. **Trhliny** - trhliny lze rozdělit podle okamžiku vzniku na trhliny za tepla, za studena, žíhací a lamelární trhliny.

Trhliny za tepla vznikají při tuhnutí a ochlazování tavné lázně a závisí na metalurgické čistotě materiálu. Jejich příčinou je tedy chemické složení základního materiálu (vysoký obsah legur). (Dula, 2012)

Trhliny za studena vznikají po skončení svařování, po transformaci austenitu na rozpadové struktury, při působení vodíku a tahových napětí ve svaru. *Lamelární trhliny* vznikají především za vysokých teplot, jak v základním materiálu, tak v místech tepelně ovlivněné zóny, šířit se mohou i za studena. *Žíhací trhliny* vznikají při žíhání svarů nebo u svarů vícevrstevných, vznikají v nízkoteplotní oblasti nebo v oblasti dolních žíhacích teplot. (Dula, 2012)



Obr. 15: Mikrotrhlina ve svaru (Autor)

2. **Dutiny** - vznikají např. při nedostatečné ochraně tavné lázně před vzdušnou vlhkostí nebo důsledkem nedostatečně vysušených bazických elektrod. Mezi dutiny lze zařadit bubliny, póry, což jsou vady objemové protáhlého nebo kulovitého tvaru vyplněné vzduchem. (Dula, 2012)
3. **Vměstky** - lze je rozdělit na různé typy. Kovové vměstky vznikají např. při svařování metodou WIG namočením wolframové elektrody do tavné lázně, nebo při zapalování oblouku dotykem o svařovaný materiál. Oxidické např. nedokonalým očištěním povrchu před svařováním. Struskové např. při nedokonalém odstranění strusky mezi jednotlivými vrstvami svařování. (Technologie 1 ČVUT, 2005)
4. **Studený spoj** - je důsledkem špatného tavného spojení svarového kovu se základním materiálem nebo navařenou housenkou. Studené spoje vznikají především důsledkem nízkého svařovacího proudu, nesprávného vedení elektrody či velké rychlosti svařování. Neprůvary či neprovařený kořen vznikají neúplným natavením základního materiálu nebo přilehlých svařových housenek. Příčinou je např. špatné sestavení před svařováním, nízký svařovací proud nebo vysoká rychlost svařování. (Dula, 2012)



Obr. 16: Studený spoj a rozstřík (Autor)

5. **Vady tvaru a rozměrů** - při vadách tvaru a rozměrů jako jsou přetečení krycí nebo kořenové vrstvy, nesprávné rozměry svaru (nedostatečná šířka, tloušťka) je častým důsledkem malá zručnost svářeče. Vytavením základního materiálu vznikají zápaly (okraj povrchu svaru vykazuje ostrá natažená prohloubení na hranicích svarové housenky a základního materiálu). Vznikne vrub, který není zaplněn svarovým kovem. Hlavními příčinami vzniku jsou velký svařovací proud, dlouhý oblouk či špatné vedení elektrody. (Dula, 2012)



Obr. 17: Zápaly (Autor)

3.4.3. Hodnocení vad

Klasifikaci vad, které se obecně vyskytují ve svarových spojích při tavném svařování, uvádí norma ČSN ISO 6520 a také norma ČSN EN 25817, ve které jsou uvedeny tolerované velikosti vad v souladu s předepsaným stupněm jakosti. Obecně je také stanovena přípustnost vad ve svarech druhem, velikostí a četností vad v závislosti na způsobu namáhání a na typu svaru. Tato přípustnost vad ve svarech je stanovena konstruktérem na základě předpokládaného provozního namáhání, vhodnosti pro daný účel tj. principu přípustné vady, kdy se vychází ze zkušeností, že vada ovlivňuje nejvíce porušování křehkým lomem a únavové porušení. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Nejnebezpečnějšími vadami jsou trhliny. Jejich hodnocení přípustnosti vychází z teorie lomové mechaniky. Hodnocení přípustnosti dalších vad ve svarech vychází z působení faktorů, jako jsou geometrie svařované konstrukce, mechanických vlastností svarového spoje a pracovního prostředí, kterému jsou svařené konstrukce vystaveny. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.5. Zkoušky svarů

Zkoušky svarů rozdělujeme podle vlivu, který mají na svarový spoj do dvou základních skupin a to na zkoušky destruktivní, při kterých dochází k porušení svaru a nedestruktivní, při kterých k porušení svaru nedochází. Především díky velké výhodě a to možnosti použití výrobků po zkoušce se nejpoužívanějšími staly nedestruktivní zkoušky svarových spojů. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Tyto zkoušky vycházejí z principu, že pokud se ve svarovém spoji nevyskytují vady, bude svarový spoj sloužit dobře v provozu. V praxi ovšem není ve velkém množství případů reálné ověřit všechny užité vlastnosti pomocí nedestruktivních zkoušek (např. pevnost svarového spoje, plastické vlastnosti, odolnost vůči cyklickému namáhání atd.). (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Zkoušky užitečných vlastností se neprokazují vůbec nebo se prokazují zkouškami destruktivními na zvláštních kusech, které jsou určeny pouze ke zkouškám a následné likvidaci. V tomto případě je dále vycházeno z předpokladu, že při zachování stejné technologie a zachování stejných podmínek jako při svaření vzorového kusu, který byl podroben zkoušce, budou tyto podmínky vzniku svarového spoje vyhovující pro další výrobu. U velmi náročných zařízení, kterými jsou např. tlakové potrubí a nádoby, či vysoce namáhané stavební konstrukce se ověřuje kvalita svarových spojů jak zkouškami destruktivními, tak zkouškami nedestruktivními. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.5.1. Destruktivní zkoušky

Destruktivní zkoušky jsou zaměřeny na kontrolu pevnostních vlastností, plastických vlastností, houževnatosti, tvrdosti, celistvosti a na určení makroskopických a mikroskopických charakteristik. Destruktivní zkoušky jsou prováděny na zkušebních vzorcích odebraných z kontrolního svarového spoje, který je určen pouze pro zkoušku a následnou likvidaci. Vzhledem ke skutečnosti, že tato zkouška je nenávratný proces není již možné opakovat zkoušku na výrobku, který je určen pro provoz. (Kopecký, 2014)

Mezi nejpoužívanější destruktivní zkoušky patří:

- Zkouška tahem
- Zkouška rázem v ohybu
- Zkouška tvrdosti
- Zkouška makroskopická a mikroskopická
- Zkouška rozlomením (Kopecký, 2014)

3.5.2. Nedestruktivní zkoušky

Základní metody používané pro kontrolu jakosti svarových spojů dělíme podle umístění vady. Vada je identifikována na povrchu, jedná se tedy o povrchovou vadu, pokud je vada identifikována uvnitř svaru, jedná se o vadu vnitřní (podpovrchovou).

Při zjišťování vad povrchových se používají metody:

1. Vizuální
2. Penetrační - kapilární
3. Magnetická prášková

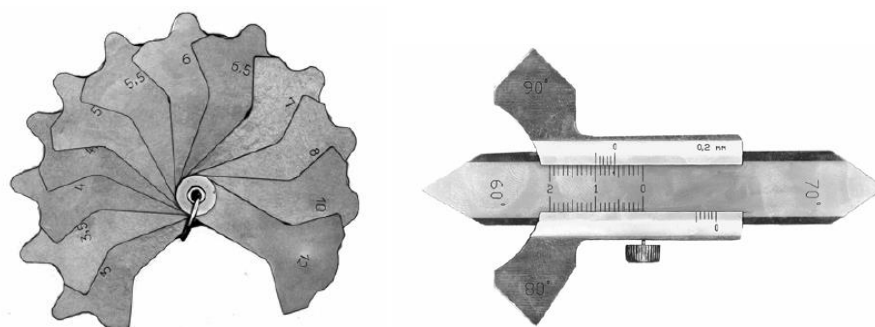
Při zjišťování vad vnitřních se používají metody:

1. Ultrazvuková
2. Prozářením (RTG)
3. **Akustická emise** (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.5.2.1. Vizuální zkouška

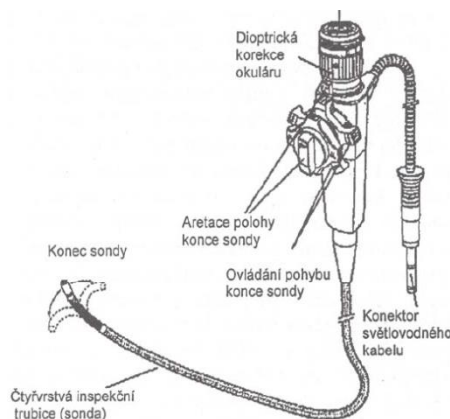
Je nejlevnější a nejjednodušší nedestruktivní metodou pro kontrolu svarových spojů. Obecně lze vizuální kontrolu rozdělit do dvou základních kategorií a to na přímou a nepřímou.

Přímá vizuální kontrola - je kontrola, při které není přerušena optická dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou. Kontrola se provádí bez pomůcek nebo s jednoduchými pomůckami jako jsou lupy, zrcadla atd. Obvykle se provádí jako místní kontrola (kontrola detailů) nebo jako kontrola všeobecná (celková). (Kopec a kol., 2008)



Obr. 18: Vizualní kontrola - měřky (Technologie 1 ČVUT, 2011)

Nepřímá vizuální kontrola - je kontrola, při které je optická dráha mezi okem pozorovatele a kontrolovanou plochou přerušena. Provádí se v případech, kdy není možné použít kontrolu přímou z důvodu nepřístupnosti nebo bezpečnosti. Kontrola se provádí s pomůckami, jako jsou videoskopy, přístroje s optickými vlákny, zahrnuje i použití fotografie či videa. (Kopec a kol., 2008)



Obr. 19: Ohebný endoskop (Technologie 1 ČVUT, 2011)

Vizuální kontrola svarových spojů se provádí obvykle jako vizuální kontrola přímá - místní. Při kontrole se posuzují vady na povrchu svarových spojů (na krycí housence i v oblasti kořene svaru), dále také tepelně ovlivněná oblast a přilehlý základní materiál ke svaru. Kontrola se provádí ihned po svařování, pokud to fyzikální okolnosti dovolí, popřípadě pokud není dohodnuto jinak a to:

- *před svařováním* - příprava; čistota svarových ploch, správné sestavení, nastavení parametrů svařování aj.
- *během svařování* - kontrola čistoty každé položené vrstvy, odstranění vad, natavení mezi svarovým kovem a základním materiálem
- *po svařování* - dokončený svar; odstranění strusky, poškození nástroji, přehřátí bruskou, rýhy, plynulost přechodu broušených ploch (Kopec a kol., 2008)

Vizuální zkouška je jediná metoda, u které jsou hodnoceny přímo samotné vady, u všech ostatních zkoušek jsou hodnoceny indikace, které ukazují na výskyt možných vad. Provádění vizuální kontroly se řídí normou ČSN EN 970. Základem zkoušky jsou předpoklady, jako dobře očištěný povrch svaru od strusky, rozstříku apod., dobře přístupný povrch svaru, dobré osvětlení místa svaru a odpovídající zrak a schopnosti zkoušejícího. Tato kontrola bývá doplněna kontrolou vnějších rozměrů svaru (měření převýšení svaru, měření velikosti svaru, vzdáleností mezi svary, měření překročení nebo podkročení velikosti koutového svaru aj.). (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.5.2.2. Zkouška penetrační - kapilární

Princip kapilární metody spočívá ve využití vzlínavosti a smáčivosti vhodných kapalin (penetrantů), jejich barevnosti nebo fluorescence. Materiál je před zkouškou dokonale připraven (umyt a odmaštěn). Zkoušený povrch je těmito materiály pokryt (menší svařence se ponoří do lázně, větší nastříkají či natrou) tak, aby kapaliny mohly vnikat do necelistvostí. Po odstranění přebytku penetrantu umytím ze zkoušeného povrchu vzlíná penetrant zbylý ve vadách na povrch. Po osušení se za pomoci kontrastní vývojky (základem je bílý prášek - často oxid zinečnatý) vytváří barevná nebo fluoreskující indikace vady. Tato indikace se hodnotí vizuálně. (Kopec a kol., 2008)

Kapilární metody rozdělujeme z hlediska druhu vytvořené indikace a způsobu jejího hodnocení:

- a) *Metodu barevné indikace* - přítomnost necelistvostí se projeví vznikem kontrastní barevné indikace, které se hodnotí v denním nebo umělém bílém světle

- b) *Metodu fluoroscenční* - přítomnost necelistvostí se projeví vznikem indikace, která světélkuje v ultrafialovém záření
- c) *Metoda dvojiúčelová* - přítomnost necelistvostí se projeví barevnou nebo fluoroscenční indikací podle druhu osvětlení (Kopec a kol., 2008)

Kapilární zkouška se provádí podle normy ČSN EN 579 - 1 a svary se vyhodnocují podle normy ČSN EN 1289. (Technologie 1 ČVUT, 2005)



Obr. 20: Znázornění vady při kapilární zkoušce (Technologie 1 ČVUT, 2011)

3.5.2.3. *Zkouška magnetická prášková*

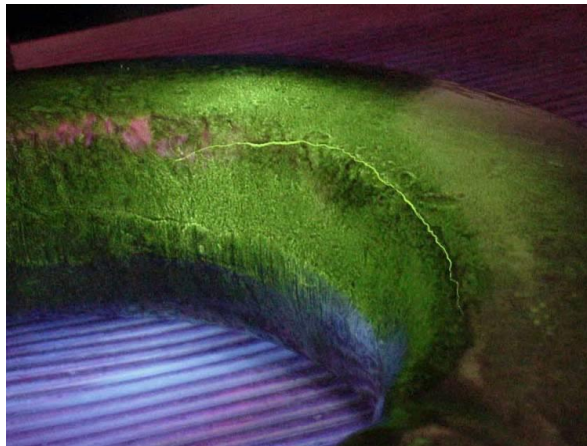
U zkoušky magnetické práškové je velmi důležité optimálně nastavit správnou hodnotu intenzity magnetického pole a orientaci magnetického pole. Nejlepší detekce je dosaženo, pokud je vada (trhlina) kolmá na směr magnetických siločar. Pokud je vada (trhlina) rovnoběžná se směrem siločar nevytvoří se rozptylový tok a vada (trhlina) nebude detekována. Méně výraznými jsou vady, které nemají výrazné rozhraní jako např. bubliny. (Kníř, 2010)

Vystupující siločáry je možné zviditelnit jemným železným prachem, ten může být rozptýlen ve vhodné kapalině např. petroleji (polévací zkouška), nebo suchý. Ke zviditelnění vady dojde ulpěním železného prachu v místě, kde vycházejí siločáry z povrchu zkoušeného svaru, v místech, které nejsou porušené, prach neulpí a steče dolů. V místě vzniku rozptylového pole je prášek přitahován a vytvoří jasnou stopu, ta je zároveň obrysem vady. Pro lepší kontrast bývá zkoušený povrch natřen bílou barvou nebo železný prach barvou fluoreskující. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

K detekování vad musí být zajištěno, aby se směr magnetických siločar co nejvíce blížil pravému úhlu (kolmo) na vadu. V tom případě je metoda nejúčinnější.

Z tohoto důvodu jsou používány různé druhy magnetizace:

- *magnetizace proudové* - průchodem elektrického proudu stejnosměrného nebo střídavého
- *magnetizování pólové* - elektromagnetem, kdy se zkoušený předmět vkládá mezi dva póly (Kníř, 2010)



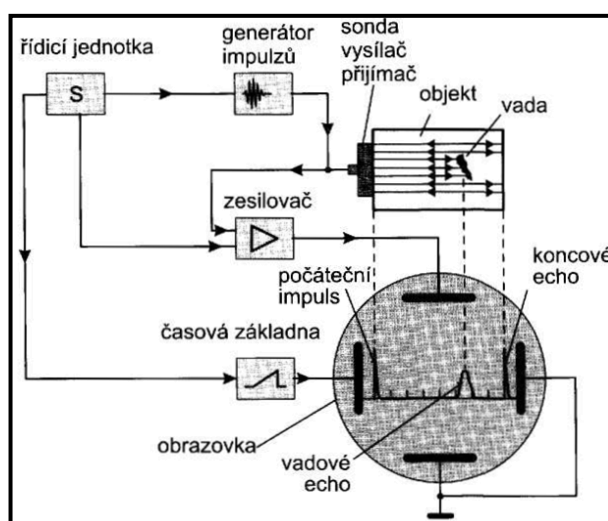
Obr. 21: Znárodnění vady při zkoušce magnetické práškové (Technologie 1 ČVUT, 2011)

Magnetické zkoušky se provádí podle norem ČSN EN 1290 a ČSN EN 1291. Výhodou magnetické zkoušky je rychlost, zkouška je provozně a ekonomicky levná, snadná obsluha a možnost odhalení podpovrchových vad. Nevýhodou je práce se špinavou kapalinou, neschopnost zjištění oblých a malých vad a obtížný záznam výsledku zkoušky. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.5.2.4. Zkouška ultrazvuková

Zkouška ultrazvuková je založena na principu odrazu vlnění na rozhraní dvou prostředí. Tyto prostředí mají odlišné vlastnosti při šíření daného vlnění. Mechanické vlnění se šíří celým prostředím určitou rychlostí. Tato rychlost je závislá na druhu prostředí a frekvenci vlnění. Při změně prostředí se náhle změní poměry v šíření vlnění na rozhraní dvou odlišných prostředí. Vlnění se láme nebo odráží. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Součástí každého ultrazvukového defektoskopického zařízení je ultrazvuková sonda, která vysílá vlnění do materiálu a přijímá koncová echa od chyb (vad). Základním prvkem sond je elektroakustický měnič, který mění elektrický signál na mechanický. Nejčastěji se v defektoskopii kovových materiálů používají sondy s piezoelektrickým měničem. Sondy bývají vyrobené ve dvou provedeních a to sondy čelní a úhlové, podle druhu vln, které sonda vysílá a přijímá. Jako indikátor se používá obrazovka, na které se zobrazují vysílané a přijímané impulsy. Při vysílání se na obrazovce objeví počáteční a koncové echo, mezi kterými jsou případná echa znázorňující chyby v kontrolovaném výrobku. (Kopec a kol., 2008)



Obr. 22: Schéma analogového ultrazvukového defektoskopu (Technologie 1 ČVUT, 2011)

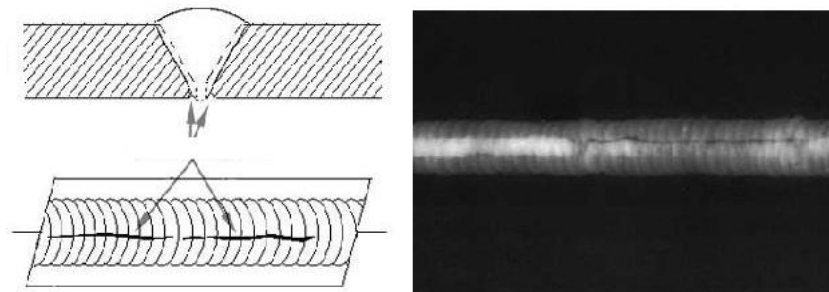
Zkoušení ultrazvukem se provádí podle normy ČSN EN 1714 a pro vyhodnocení platí norma ČSN EN 1712. Ultrazvukem jsou dobře zjistitelné vady plošného charakteru, obtížněji zjistitelné jsou vady objemové (póry, bubliny). Velice obtížné je určit typ vady, metoda se hodí spíše pro určení místa a velikosti vady. Výhodou ultrazvuku je velmi rychlý výsledek zkoušky a snadné zkoušení větších tloušťek. Nevýhodou je obtížné, až nemožné rozpoznání druhu vady. (Kopec a kol., 2008)

3.5.2.5. Zkouška prozářením (RTG)

Záření je šíření energie prostorem, pokud se tato energie šíří prostřednictvím vlnění, jde o elektromagnetické vlnění (rentgenové záření a záření gama). Pokud je nositelem energie hmotné částice (elektrony, neutrony aj.) jde o záření částicové. (Kopec a kol., 2008)

Zkouška prozářením je nejstarší nedestruktivní metodou a pracuje na principu pohlcování ionizačního záření v kontrolovaném výrobku. Z následného zviditelnění prošlého záření vhodným detektorem je tak možné stanovit místa, ve kterých jsou vady. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

V těchto místech je méně pohlcováno záření a na detektoru (filmu) se pak objeví tmavší místa. Jako zdroje záření se používají rentgenové lampy (záření rentgenové) nebo radioaktivní zářiče (gama záření). Jako detektor se používá radiografický film. Při procházení RTG záření svarovým spojem je dosaženo profilu intenzit záření na straně protilehlé ke zdroji záření. Intenzita je registrována prostřednictvím fotografického filmu na fotoluminiscenčním stínítku nebo za pomoci speciální elektronky. Intenzita záření je převáděna do elektronické podoby. (Technologie 1 ČVUT, 2005)



Obr. 23: Rentgenový obraz trhliny ve svaru (Technologie 1 ČVUT, 2011)

Intenzita záření je vyšší v místech menší tloušťky materiálu (zeslabení je způsobeno např. bublinami, póry) a projeví se zčernáním filmu v daném místě. Prozařování je možné provádět přes jednu nebo dvě stěny. Výsledkem zkoušky je radiogram, na kterém je znázorněn pomocí různého zčernání zviditelněn rozdíl pohlcení ionizujícího záření při průchodu kontrolovaným kusem. Prozařováním lze zkoušet výrobky až do stovek mm, rozeznatelnost vad se pohybuje na 1-2 % prozařované tloušťky. Prozařování je metodou velmi vhodnou pro zjišťování vad objemových, méně pro zjišťování vad plošných. Lze velmi dobře určit, o jaký typ vady se jedná a jaké parametry vada má. Při hodnocení se tedy určuje druh, velikost, četnost a vzájemná poloha vad zobrazených na radiogramu. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

Zkouška ultrazvukem se provádí podle normy ČSN EN 1435, vyhodnocení radiogramů se řídí normami ČSN EN 12517 a ČSN EN 25817. Pracoviště pro zkoušky prozářením je rizikovým pracovištěm a platí pro ně zvláštní předpisy. Prozařování je velmi drahou zkouškou, vyžadují zvláštní pracoviště, personál a speciální zařízení. (Technologie 1 ČVUT, 2005)

3.6. Akustická emise

Schopnost metody AE detekovat přítomnost a aktivitu defektů řadí tuto metodu mezi defektoskopické NDT metody. Akustická emise je využívána i k diagnostice mnoha procesů, které nemají s porušováním a defekty nic společného. Typické NDT metody charakterizují stav (výskyt porušení, defektu). Pracují s cílem zviditelnění jeho přítomnosti v materiálu. Přítomnost se projeví změnou intenzity záření, v šíření a odrazech vln, změnou toku vířivých proudů, zviditelnění kapalinou. Typické NDT metody vyhledávají přítomnost a charakterizují velikost, orientaci vad. Akustická emise detekuje a charakterizuje **rozvoj procesu**. Pracuje s cílem odposlechu akustické aktivity, emitované procesy, které probíhají v materiálu, jako jsou plastické deformace, iniciace a rozvoj porušení, svírání a rozevírání trhlin. Metoda akustické emise detekuje, lokalizuje a hodnotí aktivitu porušení a defektů **právě a pouze v jejich průběhu**. (Kopec a kol., 2008)

Podle EN 13390 nazýváme akustickou emisí elastické napěťové vlny generované dynamickým uvolněním mechanického napětí uvnitř materiálu tělesa nebo procesem působícím vznik elastických napěťových vln na povrchu tělesa. Metodou AE nazýváme metodu detekce akustické emise, následné elektronické zpracování detekovaného signálu AE a dále vyhodnocení zjištěných parametrů. Tato metoda se rozvíjí od 50. let 20. století, kdy se pojem akustická emise objevil ve fyzikálních laboratořích při studiu plastické deformace kovů. (Kopec a kol., 2008)

Proces vzniku, detekce a vyhodnocení AE lze rozdělit na několik fází:

- a) Událost zdroje AE, zdroj AE, mechanismus zdroje AE
- b) Šíření napěťových vln - AE od zdroje k místu detekce snímačem AE
- c) Detekce napěťových vln snímačem AE na povrchu tělesa - transformace AE na povrchu tělesa v místě snímače na elektrický signál AE
- d) Analogové zpracování a vedení elektrického signálu AE na vstup vyhodnocení signálu
- e) Vyhodnocení výsledného elektrického signálu AE měřícím systémem AE

(Kopec a kol., 2008)

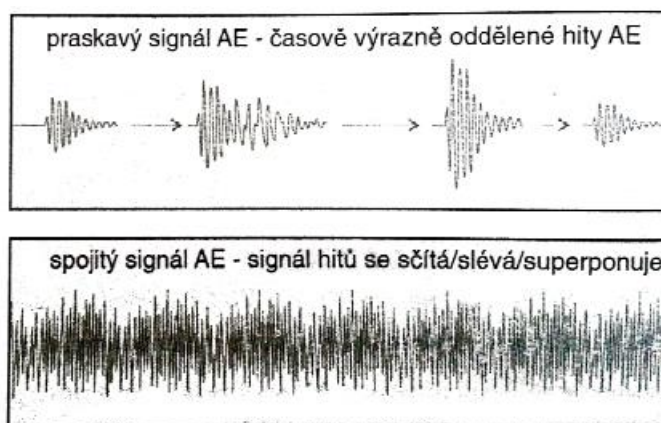
3.6.1. Zdroj a událost akustické emise

Zdrojem AE je fyzikální jev jedné nebo více událostí AE, který generuje AE např. plastická deformace doprovázená poskoky dislokací nebo proces porušení materiálu doprovázeného vznikem mikrotrhlin či únik média pod tlakem.

Událostí akustické emise je nazýván fyzikální jev, který způsobí vznik akustické emise např. dynamický vznik mikrotrhliny či klepnutí částice. Detekování rázové vlny jedné události AE vzniká v detekovaném signálu jeden izolovaný hit elektrického signálu AE. Posloupnost těchto časově izolovaných hitů tvoří praskavý signál AE. Posloupnost hustě se překrývajících hitů tvoří spojitý signál AE. (Kopec a kol., 2008)

Signály akustické emise lze rozdělit:

- *praskavý signál AE* - dochází k posloupnosti událostí AE ve větších časových odstupech, následná AE vzniká s časovým odstupem od doznění předchozí
- *spojitý signál AE* - akustické vlny jednotlivých událostí se překrývají, sčítají a vzniká akustický šum mnoha událostí (Kopec a kol., 2008)



Obr. 24: Praskavý a spojitý signál AE (Kopec a kol., 2008)

3.6.2. Měření akustické emise

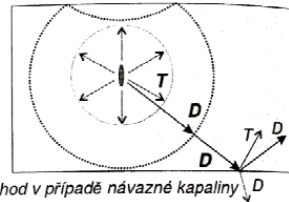
Při měření AE je obvykle využito více snímačů AE, které jsou rozmístěny na tělese (konstrukci). Stejná událost je detekována jako hit signálu AE ve více snímačích. Každý snímač ovšem registruje událost AE jinak díky rozdílnému šíření vln od zdroje k místu detekce. Lokalizace zdroje AE následně vychází ze změření časových rozdílů příchodu akustické vlny do různých snímačů. Z těchto rozdílů se následně vypočte poloha vzniku události AE. (Kopec a kol., 2008)

Zobrazení lokalizovaných událostí AE jako bodů vyjeví v mapě shluk událostí - zdroj AE. Základními časovými charakteristikami měřenými při AE je spojitost a praskavost signálu, délka trvání hitu a doba náběhu signálu hitu do maxima. Při pokročilem vyhodnocení signálu AE je předmětem analýzy také frekvence. Běžným frekvenčním pásmem detekce AE je obvykle 20 kHz až 1 MHz. (Kopec a kol., 2008)

3.6.3. Intenzita událostí akustické emise

Křehkost, plasticita, houževnatost a schopnost zpevnění jsou zásadními parametry při porušování materiálu pro posouzení intenzity AE. Intenzitu události AE, resp. výpočet posuvů v rázové vlně vyvolané poskokem defektu lze vypočítat relativně složitými výpočty. Mezi faktory posilující intenzitu AE patří nestejnorodost a nečistota materiálu, nízká tažnost, nižší zpevnění a teplota tažení či vyšší mez kluzu. Mezi faktory oslabující intenzitu AE patří stejnorodost a čistota materiálu, vysoká tažnost, vyšší zpevnění a teplota tažení či nižší mez kluzu. (Kopec a kol., 2008)

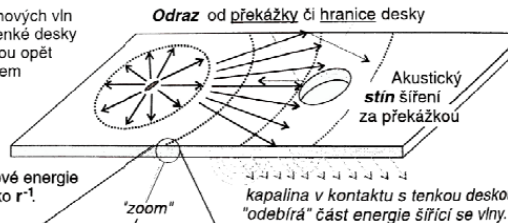
a) Vlnoplochy objemových **D** a **T** vln vyzářené ze AE zdroje do objemu jsou tvořené paprsky ve směru šíření vlnění. Na rozdíl od kapalin, kde se šíří pouze dilatační vlny **D** se v pevných tělesech šíří dva typy vln dilatační vlny **D** a příčné vlny **T**. Hustota energie nesená kulovou vlnoplochou klesá díky zákonu zachování celkové energie úměrně růstu plochy jako r^{-2} . Paprsky **D** i **T** vln se při dopadu na hranici odrážejí a rozpadají. (Případně přecházejí do sousedního prostředí).



Přechod v případě návazné kapaliny

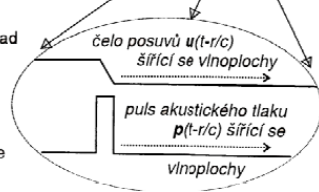
b) Vlnoplochy plošných-kruhových vln akustického pulsu v rovině tenké desky či na povrchu tlusté desky jsou opět tvořeny všesměrovým svazkem paprsků ve směru šíření od působení zdroje AE.

Hustota energie nesená v kruhové vlnoploše klesá díky zákonu zachování celkové energie úměrně růstu délky kruhu jako r^{-1} .



c) Idealizovaný příklad rozložení:

- posuvů $u(t-r/c)$ a
 - akustického tlaku $p(t-r/c)$
- ve vlnoploše šířící se od zdroje AE



Protože se puls skládá z vln, platí i pro puls,

- že se šíří rychlostí vln c
- a že $p(t-r/c) = \rho c v(t-r/c) / dt$ resp. $p = \rho c v = ZV$

Obr. 25: Šíření pulsu AE pomocí paprsků a vlnoploch (Kopec a kol., 2008)

3.6.4. Využití akustické emise jako NDT metody v praxi

Metoda AE:

- ✓ umožňuje on-line monitorování porušení za provozu, tzn. kontrolu přímo v průběhu provozu konstrukce
- ✓ sleduje aktivitu defektů z vnějšího povrchu, je metodou neinvazivní
- ✓ detekuje defekty vnější i vnitřní, jak v objemu, tak na vnitřním povrchu tělesa i v místech těžko přístupných, je metodou objemovou
- ✓ detekuje defekt a společně s ním i přítomnost podmínek pro jeho rozvoj a aktivitu
- ✓ zajišťuje v rámci jedné zkoušky za pomoci sítě snímačů kontrolu celé konstrukce či oblasti, je metodou integrální
- ✓ vyžaduje stimul rozvoje procesu - zdroje AE, procesy jsou detekovatelné pouze v průběhu rozvoje procesů, mnoho procesů je nevratných tzn., že pokud není detekována aktivita AE v okamžiku rozvoje, zkoušku nelze opakovat (Kopec a kol., 2008)

Mezi největší přednosti AE patří schopnost detekce reálné přítomnosti podmínek rozvoje porušení. Monitoruje skutečnou aktivitu a tím závažnost defektu v reálných podmínkách zatížení, při skutečné velikosti a orientaci defektu, skutečně působící úrovni a orientaci napětí, teplotních napětích, při reálném stavu materiálu a jeho degradace v místě defektu. Mezi omezení metody AE patří nemožnost detekce statických, neaktivních defektů. Pro provedení zkoušky za pomoci akustické emise bývá nutné vytvořit stimul pro vyvolání aktivity AE. Zkoušku AE nelze opakovat, aktivita defektů je nevratný jev. (Kopec a kol., 2008)

4. EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST

4.1. Návrh zkoušky pro hodnocení kvality svarů během procesu svařování

Cílem navržené zkoušky je ověření možnosti využití záznamu akustické emise při vyhodnocení kvality svarů již během procesu svařování a dále možnost přenesení výsledků zkoušky do praxe experta v oblasti nedestruktivního zkoušení svarových spojů. Navržená zkouška bude provedena na vzorcích o různé svařitelnosti a to na oceli zaručeně svařitelné a oceli obtížně svařitelné. Materiály o různé svařitelnosti jsou zvoleny z důvodu co největšího rozdílu v záznamu akustické emise.

4.1.1. Materiál pro svařování

Materiál č. 1 - S235JRC; ČSN EN 10025-96

Použití: Součásti konstrukcí a strojů menších tloušťek, i tavně svařované, s částmí tvářenými za studena, staticky i mírně dynamicky namáhané aj., pracují i za snížených teplot do -20°C .

Vzorky: Vzorky pro účely experimentální části diplomové práce jsou z daného materiálu vyřezány laserem v rozměrech 250 x 30 x 5 mm.

Tab. 2: Ocel S235JRC (Firemní materiálový list - autor)

W Nr. (číslo materiálu) 1.0120		Jakostní ocel			OCEL Kurzname (značka) S235JRC
Chemické složení [hm. %] v tavebním vzorku					
C ¹⁾	Mn	P	S	N ^{2) 3)}	
max 0,17	max 1,40	max 0,045	max 0,045	max 0,009	
Chemické složení [hm. %] ve výrobku					
C ¹⁾	Mn	P	S	N ^{2) 3)}	
max 0,21	max 1,50	max 0,055	max 0,055	max 0,011	
Normy DIN					
DIN EN 10025 + A1-96 – výrobky válcované za tepla z nelegovaných konstrukčních ocelí					
Mechanické vlastnosti					
Rozměr t, d [mm]	< 3	3–16	17–25		
Stav	normalizačně žháný				
Mez kluzu R _{yk} [MPa] min	235			225	
Mez pevnosti R _m [MPa]	360–510		340–470		
Tažnost A ₅ [%]	podél min	21	26		
	napříč min	19	24		
Nárazová práce KV ²⁰ [J] min	–			27	
Tvrdość HB	–				
Fyzikální vlastnosti					
Hustota ρ [kg · m ⁻³]	7 850				
Technologické údaje					
TVARITELNOST vhodná k ohýbání, ohraňování, obrubování, lemování, profilování a tažení za studena					
SVAŘITELNOST vhodná pro svařování					
uhlíkový ekvivalent $CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$					
t ≤ 25 mm	CEV ≤ 0,35				

Materiál č. 2 - 90MnCrV8; 19 312

Použití: Řezné nástroje na nekovy, nástroje pro stříhání a tváření za studena, tvarově složitější, středně namáhané formy pro lisování kovových a nekovových prášků pro zpracování plastů s požadavkem na dobrou stálost rozměrů po tepelném zpracování, dále ruční nářadí (závitníky, závitové čelisti) či různé druhy dílenských měřidel.

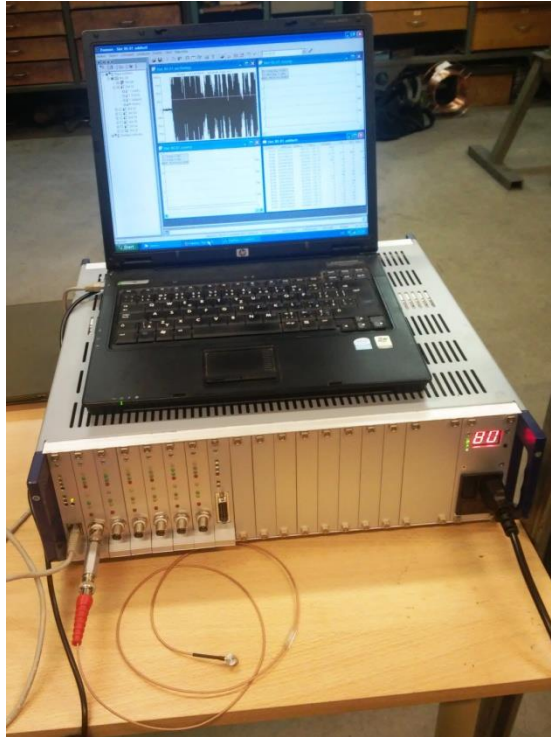
Vzorky: Vzorky pro účely experimentální části diplomové práce jsou z daného materiálu vyřezány laserem v rozměrech 250 x 30 x 5 mm.

Tab. 3: Ocel 90MnCrV8 (Firemní materiálový list - autor)

ČSN 41 9312 STN 41 9312		Nízkolegovaná Mn-V ocel pro práci za studena			19 312 Značka	
Chemické složení [hm. %]						
C	Mn	Si	P	S	V	
0,75–0,85	1,85–2,15	0,15–0,35	max 0,030	max 0,035	0,10–0,20	
Dovolené úchytky chemického složení hotového výrobku						
± 0,02	± 0,05	± 0,03	–	–	± 0,02	
Polotovary						
[1] tyče válcované nebo kované za tepla (kruhové, čtvercové, ploché)			[4] výkovky – kruhové do průměru 320 mm – čtvercové do rozměru 280 mm – ploché do rozměru 500 x 160 mm			
[2] tyče broušené						
[3] plechy válcované za tepla (okujené nebo mořené)						
Mechanické vlastnosti						
Polotovar	[1] [2] [3] [4]			[1] [2] [3] [4]		
Rozměr d [mm]	20			–		
Stav	kalený a popuštěný			.3		
Tvrdost HRC	55–62 (K. t. 780 °C / oleji; P. t. 100–300 °C / 2 h)			max 225 HB		
Pevnost v ohybu R _m [MPa]	4300 (při tvrdosti 60 HRC)			–		
Mez kluzu v tlaku R _{0,2} [MPa]	2200–3000 (při tvrdosti 55–62 HRC)			–		
Fyzikální vlastnosti						
Hustota ρ [kg·m ⁻³]	Měrná tepelná kapacita c _p [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Tepelní součinitel roztažnosti α [K ⁻¹]	Tepelná vodivost λ _x [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Rezistivita ρ [Ω·m]		
7 840	–	13,4·10 ⁻⁶	38,5	–		
Odolnost proti degračním procesům						
ODOLNOST PROTI KOROZI malá	ODOLNOST PROTI KŘEHKÉMU LOMU snížená		ODOLNOST PROTI OPOTŘEBENÍ poměrná celková odolnost abrazi 170%			
Technologické údaje						
TEPELNÉ ZPRACOVÁNÍ						
žhánění na měřko	680–710 °C	ochlazovat v peci; max. tvrdost 225 HB				
žhánění ke snížení prutí	600–650 °C	ochlazovat v peci				
kalení	740–780 °C	ochlazovat v oleji – menší kusy min. tvrdost 61 HRC				
	780–800 °C	ochlazovat v oleji – větší kusy min. tvrdost 61 HRC				
teploty přeměn	A ₃₁ ~ 710–730 °C	M ₃ ~ 195 °C				
prokalitelnost	v celém průřezu	max. do 35 mm				
popuštění	150–300 °C					
délkové změny po kalení a popuštění	0,05 %					
SVARITELNOST obtížná						
OBROBITELNOST						
soustružení, hoblování	třída obrobitelnosti 11b					
frézování, vrtání	11b					
broušení	8b					

4.1.2. Zařízení pro měření AE

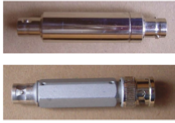
Přístrojové vybavení pro měření záznamu akustické emise při svařování v experimentální části diplomové práce je znázorněno na obr. 26.



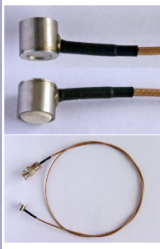
Obr. 26: Zařízení pro měření akustické emise

Pro měření záznamu akustické emise při svařování zkušebních vzorků z ocelí obtížně a zaručeně svařitelných je použit analyzátor akustické emise DAKEL-XEDO. Tento analyzátor je propojen s PC, ve kterém jsou data ukládána, analyzována a následně zobrazována pomocí softwaru Daemon a Deashow. Pro měření je dále použit snímač DAKEL IDK-09 a předzesilovač DAKEL-XEDO.

Tab. 4: Předzesilovač akustické emise - technické parametry (dakel.cz)

	Zisk:	asi 35 dB
	Vstupní impedance:	150 kOhmů
	Napájecí napětí:	12V až 35V
	Způsob napájení:	po výstupním koaxiálním kabelu
	Spotřeba proudu:	cca 6 mA/12V, cca 7 mA/35V
	Provozní teplota:	-20°C až +85°C
	Vstup:	zásuvka BNC
	Výstup:	zásuvka, nebo vidlice BNC


Tab. 4: Snímač akustické emise IDK-09 - technické parametry (dakel.cz)

	rozměry	ø 9 mm, výška 9 mm
	Materiál pouzdra	nerezová ocel
	Dotyková plocha	korund ø 6mm
	Provedení vývodu	radiální vývod koaxiálním kabelem o průměru 1.7 mm s BNC konektorem
	Materiál piezoelementu	PZT třída 200
	Provozní teplota	-20°C až +95°C
	Určení snímačů	pro laboratorní i průmyslová měření akustické emise
	Předzesilovač	není snímač vyžaduje externí koaxiální impedanční převodník s předzesilovačem, pokud by koaxiální trasa byla delší než cca 2 m
	Pripevnění snímače	lepením magnetický držák

4.1.3. Svařování

Svařování vzorků je provedeno metodou MAG/CO2 svářečkou Kühntreiber KIT 305 Economic Processor za použití přídatného drátu Linde welding wire G3Si1.

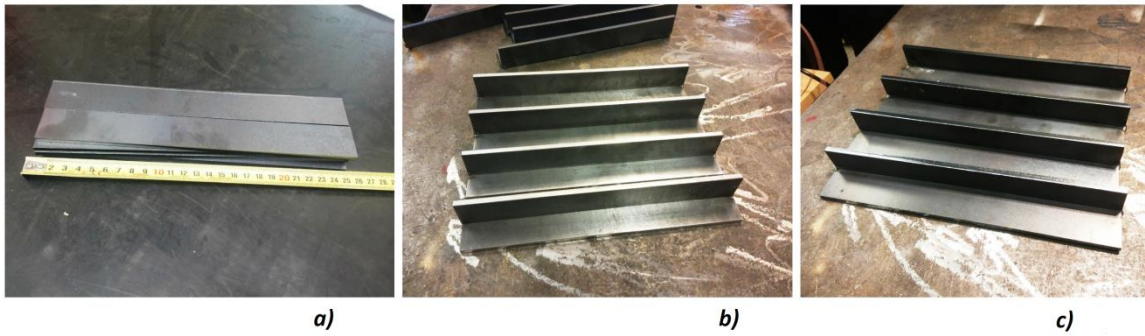
Tab. 5: Svářečka KIT 305 - technické parametry (kuhtreiber.cz)

	Napájecí napětí	50/60 Hz - 3x400 V
	Rozsah svařovacího proudu	30-280 A
	Napětí na prázdko	17-38 V
	Vinutí trať	Cu
	Počet reg. stupňů	20
	Rychlost podávání	0,5-20 m/min
	Průměr drátu	0,6 - 1,2 mm
	Rozměry	835x480x840 mm
	Hmotnost	98 kg

4.2. Zkouška pro hodnocení kvality svarů během procesu svařování

4.2.1. Svařování a měření záznamu AE

V první fázi experimentální části zkoušky byly připravené vzorky z materiálů zaručeně svařitelného S235JRC a z materiálu obtížně svařitelného 90MnCrV8 očištěny od strusky a okují po řezání laserem. Po nastavení výchozích parametrů pro svařování svářečkou Kühntreiber KIT 305 Economic Processor, kdy byl nastaven svařovací proud 144 A, napětí 25,3 V, byly vzorky spojeny bodovými svary do požadovaného tvaru pro svařování.



Obr. 27: Příprava vzorků - a) Začištěné vzorky z materiálu S235JRC; b) Vzorky z materiálu 90MnCrV8 spojené bodovými svary; c) Vzorky z materiálu S235JRC spojené bodovými svary

Ve druhé fázi experimentální části zkoušky byl pro měření záznamu akustické emise při svařování zkušebních vzorků nastaven analyzátor akustické emise DAKEL-XEDO. Tento analyzátor byl propojen s notebookem, ve kterém byla data ukládána, analyzována a následně zobrazována pomocí softwaru Daemon a Deashow. Pro měření byl dále použit snímač DAKEL IDK-09 a předzesilovač DAKEL-XEDO.

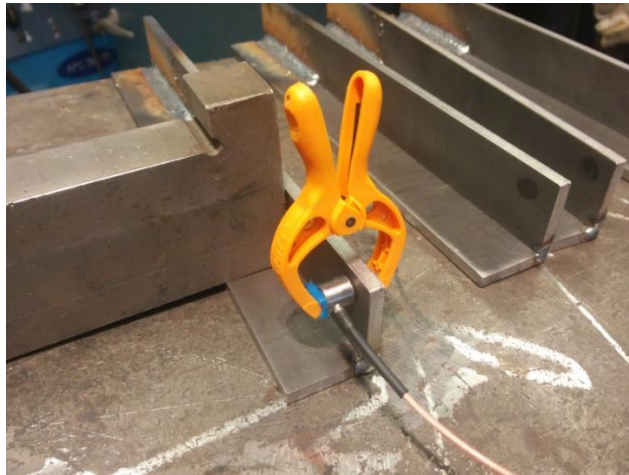


Obr. 28: Příprava a umístění snímače na vzorek

Vzhledem k velikosti vzorků (250 x 30 x 5 mm) byla délka koutového svaru na všech vzorcích zvolena cca 60 mm. Z důvodu možného poškození snímače vysokou teplotou při svařování bylo provedeno několik opatření.

Mezi opatření proti poškození snímače vysokou teplotou patřilo:

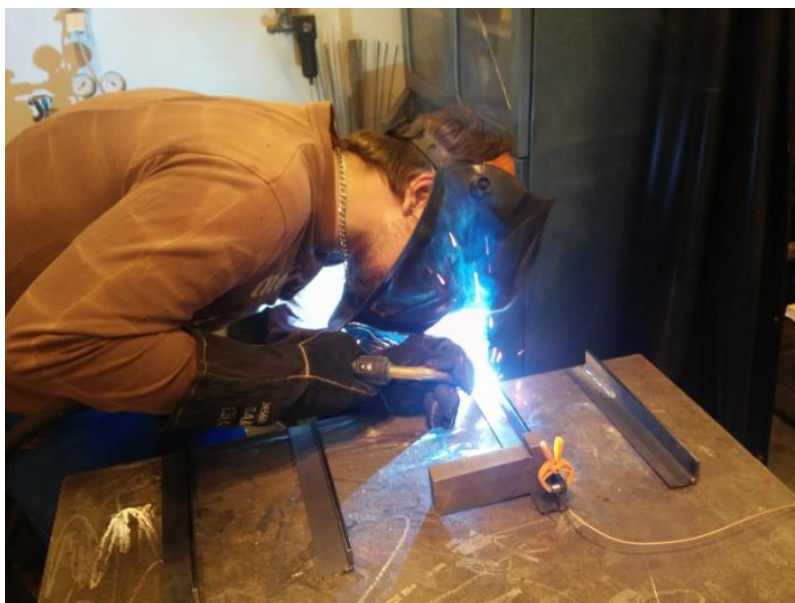
- umístění snímače na vzorcích v bezpečné vzdálenosti od svařování
- umístění clony z kovového materiálu mezi svarem a snímačem
- potřetí snímače vazebním médiem a přisvorkování namísto lepení



Obr. 29: Ochrana snímače na vzorku z materiálu 90MnCrV8



Obr. 30: Nastavené parametry pro svařování



Obr. 31: Průběh svařování vzorku z materiálu 90MnCrV8

Po umístění snímače na vzorek za pomoci vazebního média a svorky a následném umístění ochranného kovového přípravku bylo započato svařování, při kterém došlo k vytvoření 60 mm dlouhého koutového svaru. Průběh svařování byl měřen a zaznamenáván po dobu 180 s od počátku svařování.



Obr. 32: Průběh měření AE

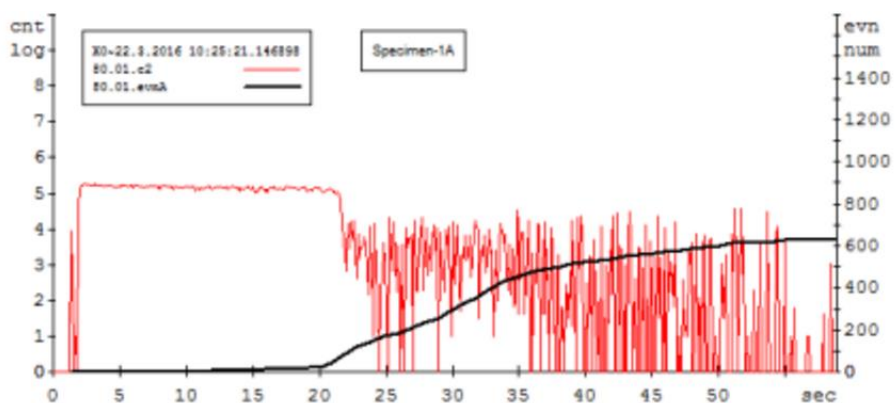


Obr. 33: Svařené vzorky

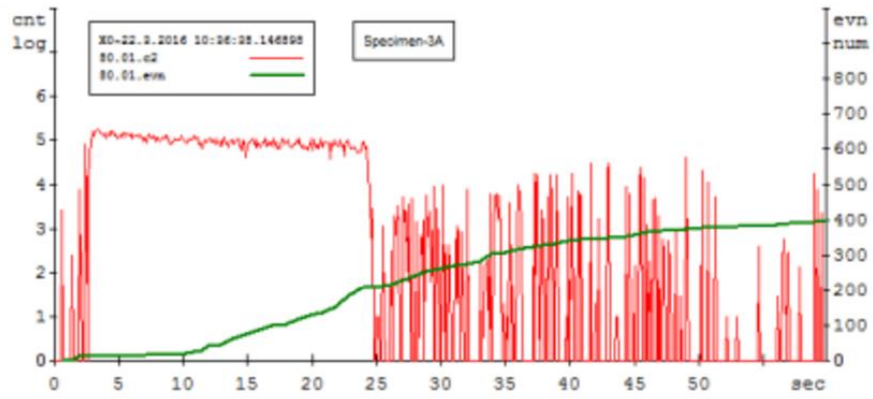
4.2.1. Naměřená data AE

4.2.1.1. Záznamy akustické emise na vzorcích z materiálu S235JRC

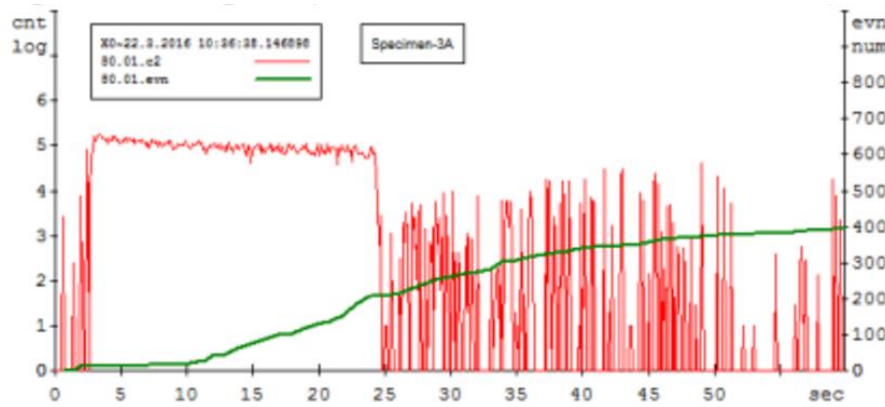
Z obr. 34 – 37 je vidět typický průběh záznamu AE u vzorků z oceli se zaručenou svařitelností. Podle záznamu o součtu překmitů přes nastavenou hodnotu i celkového vzhledu hitu je možno hodnotit záznam s ohledem na průběh chladnutí uvedené oceli.



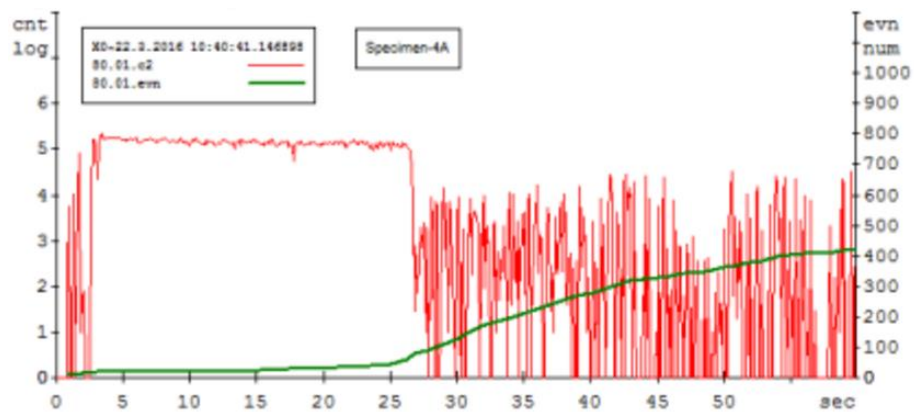
Obr. 34: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 1 z materiálu S235JRC



Obr. 35: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 2 z materiálu S235JRC



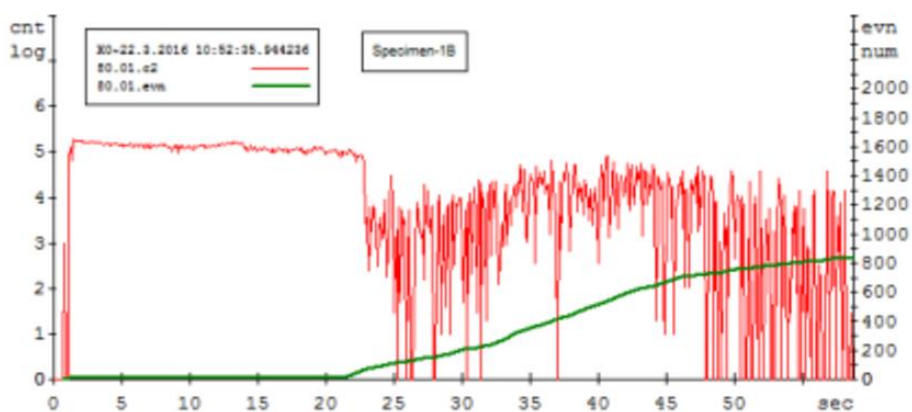
Obr. 36: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 3 z materiálu S235JRC



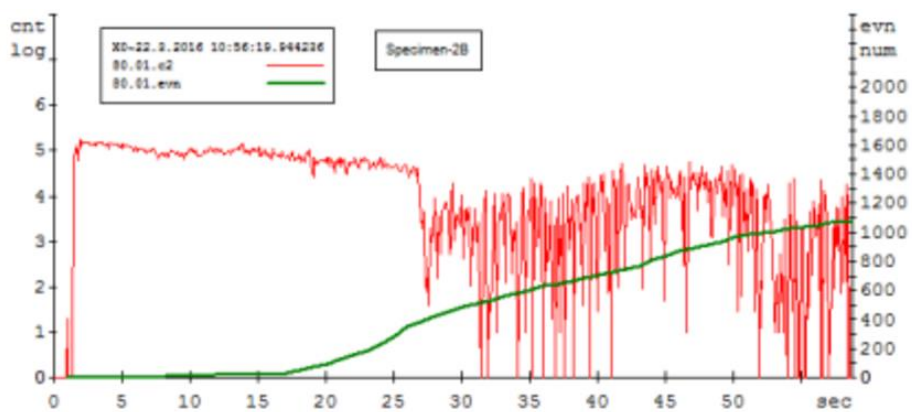
Obr. 37: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 4 z materiálu S235JRC

4.2.1.2. Záznamy akustické emise na vzorcích z materiálu 90MnCrV8

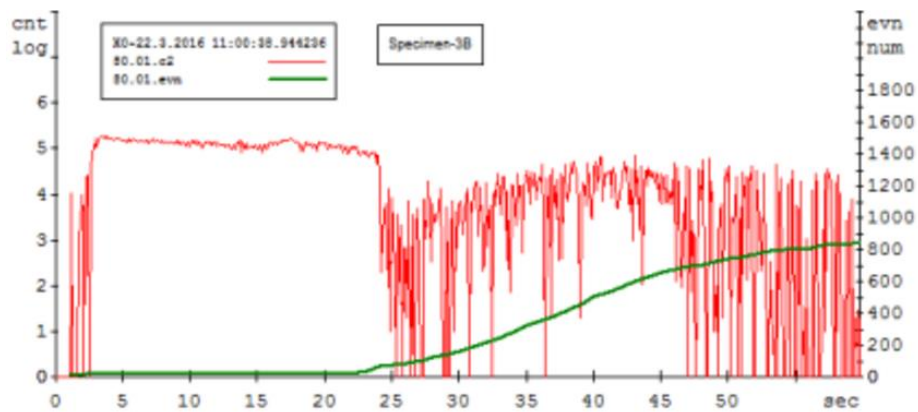
Na obr. 38 – 41 je patrný odlišný vzhled záznamu, hlavně z pohledu počtu událostí, kdy tento dosahuje až dvojnásobných hodnot. Záznam se zdá být nekompaktní, ale chybějící zakreslení v počtu událostí odpovídá jeho velkému množství. Velké množství událostí není možné z pohledu snímače zaznamenat. Záznam z průběhu svařování nevhodného materiálu je opět příznačný.



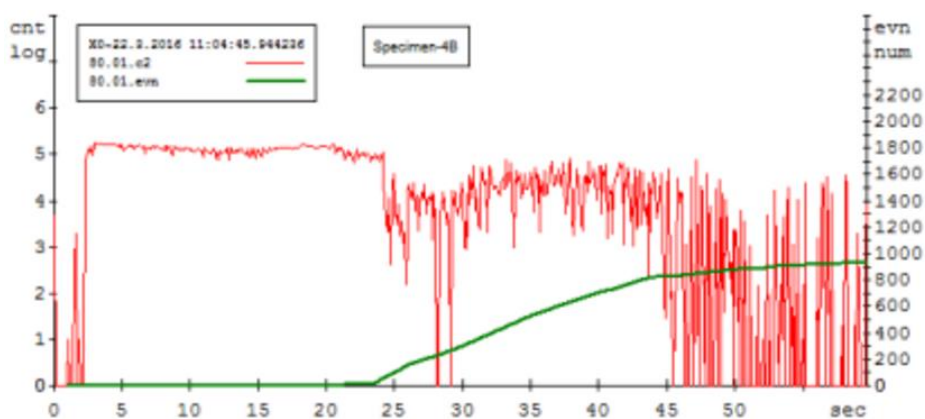
Obr. 38: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 1 z materiálu 90MnCrV8



Obr. 39: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 2 z materiálu 90MnCrV8



Obr. 40: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 3 z materiálu 90MnCrV8



Obr. 41: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 4 z materiálu 90MnCrV8

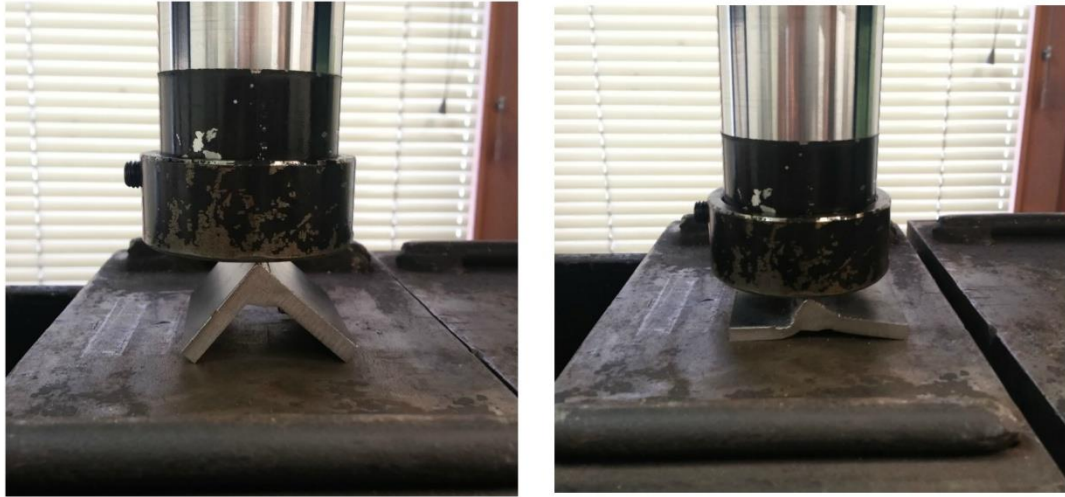
4.2.2. Pevnostní verifikace

Kvalita provedených svarů při svařování materiálů o obtížné a zaručené svařitelnosti byla otestována na ručním hydraulickém lisu OMA 655 o $F_{\max}=250$ kN a zdvihu pístu 180 mm.

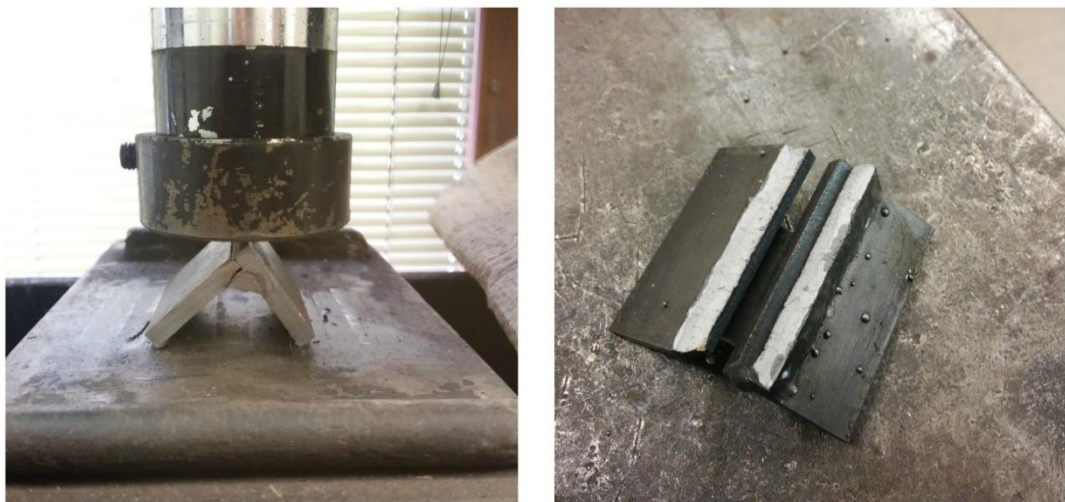


Obr. 42: Hydraulický lis OMA 655

Pro tento účel byly svařené vzorky nařezány na pásové pile na délku 50 mm. Vzorky byly umístěny pod píst hydraulického lisu místem styku dvou ploch vytvářející roh, na jejichž vnitřní straně byl proveden koutový svar.



Obr. 43: Vzorek z materiálu S235JRC před/po zkoušce

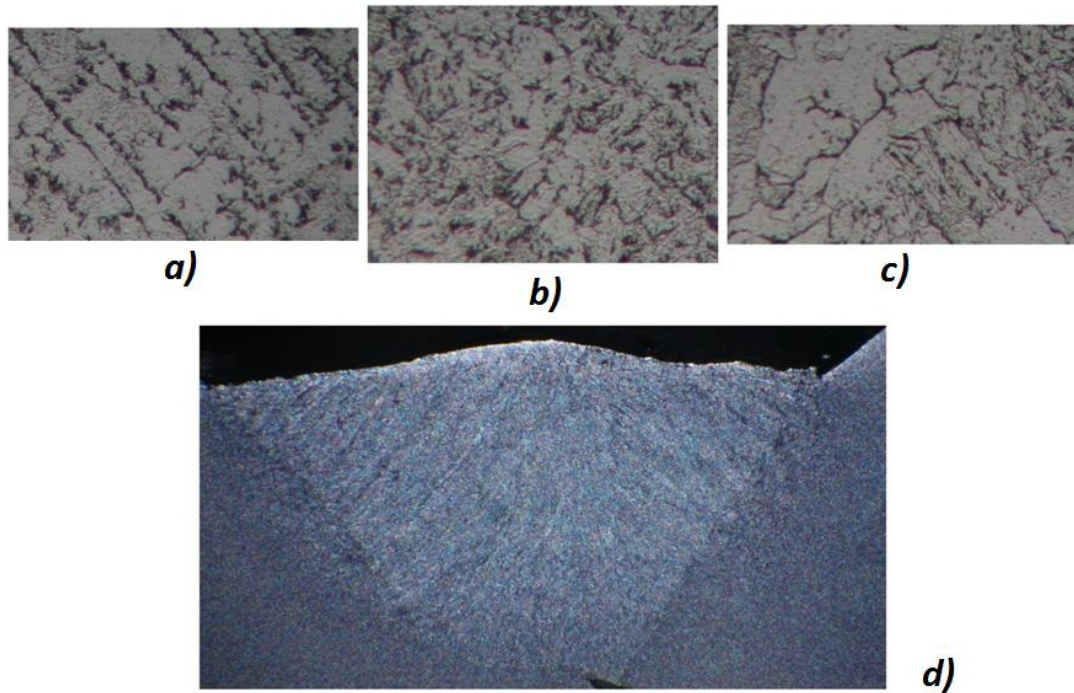


Obr. 44: Vzorek z materiálu 90MnCrV8 před/po zkoušce

V průběhu zkoušky byl zaznamenáván průběh působícího tlaku na vzorky a vznik deformací. Vzorky z materiálu 90MnCrV8 vykazovaly již v průběhu řezání na pásové pile značnou křehkost svaru. V průběhu řezání došlo u dvou vzorků k trhlinám ve svaru.

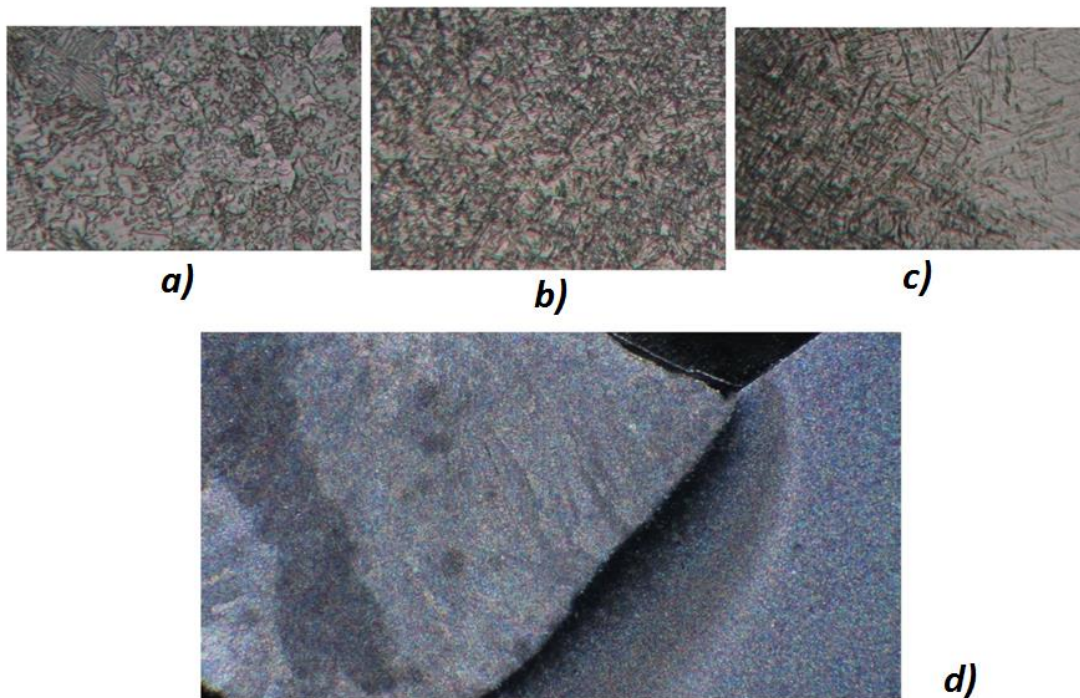
4.2.3. Materiálová verifikace

Materiálová výbrus svarů vzorků z materiálu zaručeně svařitelného S235JRC a materiálu obtížně svařitelného 90MnCrV8 byla provedena na metalografické rozbrusovače Struers DAP - 34 Pedemin, zpracováním způsobem broušení - leštění - leptání. Následné pozorování bylo provedeno na světelném mikroskopu Neophot 21.



Obr. 45: Metalografický výbrus vzorku z materiálu S235JRC

- a) základní materiál
- b) přechodová oblast (TOO)
- c) svarový kov
- d) celkový pohled



Obr. 46: Metalografický výbrus vzorku z materiálu 90MnCrV8

- a) základní materiál*
- b) svarový kov*
- c) přechodová oblast (TOO)*
- d) celkový pohled*

Metalografické pozorování zdokumentovalo homogenitu, jak svarového kovu, tak i průběhu struktury oblasti TOO. Kvalita svarů u materiálu S235JRC je zřejmá z pohledu minimálního výskytu sekundárních defektů a plynulého přechodu mezi svarovým kovem, TOO a základním materiálem. U materiálu 90MnCrV8 lze zřetelně vidět přechodové pásy s fázovou přeměnou, která v oblasti TOO vytváří strukturní vrub. Jde vlastně o rozhraní mezi strukturou zakalenou a svarovým kovem. V této oblasti je přítomno velké množství iniciačních míst z pohledu kritické délky trhliny při hodnocení lomové houževnatosti, která je aplikována při výpočtech štěpného porušení. Zvětšení na uvedených snímcích je z tohoto pohledu nedostačující z důvodu velmi malých hodnot a_{krit} u materiálu vykazující křehko-lomové porušení.

5. DISKUZE

5.1. Diskuse experimentálních výsledků

Z uvedených obrázků je při vizuálním hodnocení vidět enormní rozstřík svarového kovu u oceli 90MnCrV8. Rovněž ochlazovací izotermy (kresba) svarové housenky jsou u této oceli více nehomogenní. Svědčí to o tepelném ovlivnění okolního materiálu větším množstvím vneseného tepla, které je vzhledem k probíhající fázové transformaci v tepelně ovlivněné oblasti mnohem vyšší (viz obr. 47).



Obr. 47: Porovnání svařenců obou typů ocelí při vizuálním hodnocení

O velikosti vneseného tepla, které je v materiálu svařence nerovnoměrně distribuováno svědčí i pohled na zadní stranu svařených zkušebních vzorků. Transformační zóna fázové přeměny je zřetelná z obr. 48.



Obr. 48: Zviditelnění přechodové oblasti (TOO)

Pracovní tlak lisu při pevnostní verifikaci svaru se u oceli s obtížnou svařitelností (90MnCrV8) pohyboval běžně v hodnotách o 30-50 % vyšších než u oceli s dobrou svařitelností.

Tlak v některých případech nebylo možné hodnotit z důvodu bleskové fragmentace vzorku (křehký lom svaru). Zařízení nemá paměťový záznam a proto je registrace vyšších hodnot nemožná. Typické hodnoty tlaku jsou na obr. 49.



Obr. 49: Ukázka typické hodnoty zatěžovacího tlaku u oceli 90MnCrV8

U štěpně porušených vzorků lze jednoznačně hodnotit polohu trhliny rovnoběžnou s povrchem přivařené stěny, což svědčí o iniciaci křehké trhliny v tepelně ovlivněné oblasti ze sekundárních opožděných trhlín (obr. 50).



Obr. 50: Masivní rozstřík svarového kovu a poloha štěpné trhliny

Tvrzení uvedené dříve dokládá i obr. 51, kde je plocha štěpné trhliny konkávního tvaru, ale její iniciační místo spadá opět do oblasti TOO.



Obr. 51: Zvlnění lomové plochy při nerovnoměrném působení tlakového zatížení

Rovněž porušení svaru u oceli 90MnCrV8 při oddělování zkušebnímu úhelníku ze svařence vykazuje obecně platné tvrzení o iniciaci lomu v TOO (obr. 52).



Obr. 52: Porušení svaru při přípravě vzorku

Při verifikaci pevnosti svarů oceli se zaručenou svařitelností (S235JRC) se hodnoty zatěžovacího zařízení pohybovaly v rozmezí hodnot 30 - 50 barů u všech zkoušených vzorků (obr. 53). Záznam tlaku byl na stupnici patrný i na konci zkoušky s ohledem na skutečnost, že u všech vzorků došlo k plastické deformaci ramen úhelníku bez natržení svarového kovu (obr. 54).

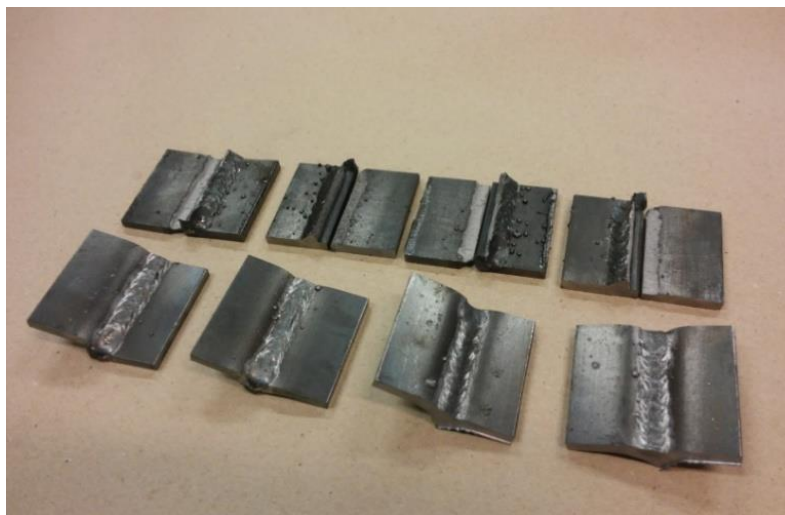


Obr. 53: Typický záznam výsledného tlaku u oceli S235JRC



Obr. 54: Plastická deformace svařence z materiálu S235JRC

Vzhled examinovaných vzorků byl ve všech případech stejný, tzn. u svařitelné oceli S235JRC nastala ve všech případech plastická deformace bez porušení svarové housenky, zatímco u oceli 90MnCrV8 nastalo vždy štěpné porušení a vyzáření naakumulovaného napětí v průběhu zkoušky (obr. 55).



Obr. 55: Porovnání typu poškození u zkoušených vzorků

5.2. Přínos AE v praxi expertního inženýra

Z uvedených závěrů experimentálních prací je zřejmé, že jak hodnocení svařovacího procesu nedestruktivní zkušební metodou (AE, nebo jak dnes bývá označována AT - acoustic testing), tak i hodnocení podle uvedené mechanické metody verifikace kvality svarů je velmi přínosné pro všeobecný rozhled a základní znalosti hodnotitele poškozeného svařence. Zatímco záznam z AE (AT) je možné pořídit jen během svařování, poznatky z hodnocení degradace svaru lze využít i post factum, tj. při hodnocení následků poškození svařované konstrukce.

Z hlediska ekonomického lze považovat navrženou zkoušku hodnocení kvality svarů během procesu z pohledu větší sériové výroby či hodnocení rozměrných a složitých svařenců či konstrukcí za velmi zajímavou a finančně dostupnou. Zakoupení zařízení pro měření AE, popřípadě její zapůjčení spolu se zaškolením na některém z akreditovaných pracovišť v ČR je pro větší či střední výrobní podniky zabývající se sériovou výrobou svařenců či výrobou složitějších svařovaných konstrukcí jistě finančně přijatelné a rentabilní z hlediska kvality.

Význam získaných experimentálních výsledků v oblasti technického znalectví může mít dalekosáhlé dopady v případě vytváření expertního posudku, kdy hodnotitel může jasně stanovit, zda byla použita vhodná technologie pro vytvoření materiálového spoje. Na základě tohoto rozhodnutí může být navržena verifikační zkouška svařitelnosti, kde lze s velkou výhodou použít i metodu akustické emise.

Pokud je získán záznam srovnatelný s obr. 34 - 37, lze hovořit o vhodném materiálu pro svařování a potvrdí-li to i pevnostní zkoušky, může hodnotitel vyřknout pozitivní závěry. V případě, že výsledky z ověřovacích zkoušek vykazují v záznamech AE shodu s obr. 38 - 41 a při následných pevnostních testech dochází k fragmentaci vzorků štěpným lomem, lze jednoznačně usoudit, že došlo k vědomé či nevědomé záměně materiálu, resp. nevhodné technologii spojování pro použitý materiál. Je tedy zcela zřejmé, že jak zkouška metodou AE, tzn. in situ, tak i zkouška ověření pevnosti svarů může hrát významnou roli při vzniku expertního posudku.

6. ZÁVĚR

Předložená diplomová práce s názvem „Význam nedestruktivního zkoušení v oblasti hodnocení kvality svarů během procesu“ pojednává o vysoce aktuálním hodnocení materiálových spojů. Práce je rozdělena na dvě části. První část lze označit jako kompilační soubor, který je vytvořen rešeršními poznatky z odborné literatury. Je nezbytným základem pro vypracování celkové metodiky zkoušení v experimentální části diplomové práce. Tu tvoří rozvinutí aplikace NDT metody – akustické emise v oblasti přímého sledování technologického procesu. Navazuje tím na návrh metody verifikace svařování v práci „Vizualizace tavného procesu svařování“ (Kraus 2014), která se věnovala studiu hlavně problematiky chladnutí svarového spoje.

V předložené práci je hodnocení fokusováno do oblasti v okamžiku při ztuhnutí tavné lázně. Hodnocení svařitelnosti je zde pak odvozeno nejen z počtu událostí zaznamenaných akustickou emisí, ale i z výsledků při aplikaci mechanického zatěžování svarového spoje. Uvedené zkoušky jsou propracovány do normativní fáze přímé aplikace v průmyslovém využití i následného uplatnění v praxi expertního inženýra.

Obě části diplomové práce vytváří podklad pro možnost kvalifikovaného hodnocení provozní události z pohledu jakosti u hodnocené kvality svaru. Tvoří tak soubor názorných požadavků z hlediska technických znalostí posuzovatele, který zvládnutím jak teoretické části v oblasti svařování, tak i v oblasti experimentální (zkoušení NDT i aplikace mechanických zkoušek) může dokázat svoji erudici.

Práce je nejen teoreticky velmi aktuální z pohledu verifikace kvality svarů, ale současně ukazuje i způsob experimentálního vyhodnocení v technické praxi.

7. SEZNAM LITERATURY A POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. AMBROŽ, O., KANDUS, B., KUBÍČEK, J. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. 1. vyd. Ostrava: ZERROSS, 2001. 395s. ISBN 80-85771-81-0.
2. HLAVÁČEK, P. *Svařování neželezných kovů*. Bakalářská práce. Brno: MENDELU Brno, 2013, 54s.
3. HRIVŇÁK, I. *Zváranie a zvariteľnosť materiálov*. 1. vyd. Bratislava: Slovenská technická univerzita, 2009. 486s. ISBN 978-80-227-3167-6.
4. KNÍŘ, J. *Nedestruktivní metody kontroly vybraných dílů letadla*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010, 59 s.
5. KOPEC, B. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571s. ISBN 978-80-7204-591-4.
6. KOPECKÝ, L. *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.
7. KOUKAL, J; ZMYDLENÝ, T. *Svařování I.*, Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2005, 133s. ISBN 80-248-0870-6.
8. KRAUS, J. *Vizualizace procesu tavného svařování*. Diplomová práce. Brno: MENDELU Brno, 2014, 111s.
9. POLÁK, V. *Moderní trendy v technologii svařování technických materiálů*. Bakalářská práce. Brno: MENDELU Brno, 2013, 55s.
10. *Prezentace pro předmět Technologie I.*, ČVUT, Praha, 2011, [cit. 2016-02-22]

Internetové zdroje

11. BENEŠ, L. *Přehled svařování*. In: Cvut.cz [online]. ČVUT, 2013 [cit. 2016-02-02]. Dostupné z: http://users.fs.cvut.cz/libor.benes/vyuka/svarovani/UT_01_Prehled_svarovani_T08.pdf
12. DULA, J. *Metrologie ve strojírenství: Kontrola svarů*. In: www.uh.cz [online]. Uherské Hradiště, 2012 [cit. 2016-01-03]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szesgsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>

13. KUBÍČEK, M. *Svařování: Svařitelnost, technologické zásady, příprava materiálu*. In: Spssbrno.cz [online]. Brno, 2013 [cit. 2015-10-21]. Dostupné z: http://domes.spssbrno.cz/web/DUMy/STT,%20KOM/VY_32_INOVACE_21-03.pdf
14. KULHÁNEK, Karel a kol. *Výukový vzdělávací modul svařování: Plamenem (auto-gen)*. In: Sosasou-opvk.cz [online]. 2010 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: <http://sosasou-opvk.cz/3doc/vmsp/vvmsp.pdf>
15. KULHÁNEK, K. a kol. *Výukový vzdělávací modul svařování: Elektrický oblouk*. In: Sosasou-opvk.cz [online]. 2010 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: http://sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_elektricky_oblouk.pdf
16. KULHÁNEK, K. a kol. *Výukový vzdělávací modul svařování: MIG-MAG*. In: Sosasou-opvk.cz [online]. 2010 [cit. 2016-01-16]. Dostupné z: http://sosasou-opvk.cz/3doc/vys/Vyukovy_vzdelavaci_modul_svarovani_MIG-MAG.pdf
17. Kolektiv autorů při ISS Čeb. *Technologie svařování - učební text*. In: [Http://iss-cheb.cz](http://iss-cheb.cz) [online]. 2010 [cit. 2015-11-21]. Dostupné z: <http://iss-cheb.cz/projekt/Sva%C5%99ov%C3%A1n%C3%AD.pdf>
18. MIG /MAG svařování. Automig.cz [online]. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/migmag-co2/>
19. Svařování elektrickým obloukem. Eluc.kr-olomoucky.cz [online]. [cit. 2015-12-11]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/1806>
20. TIG (Tungsten Inert Gas Welding). Automig.cz [online]. [cit. 2015-11-10]. Dostupné z: <http://automig.cz/o-svarovani/metody/tig-wig-plasmatig/>
21. TIG svařování I - základní principy. In: Svarinfo.cz - magazín praktického svařování [online]. 2009 [cit. 2016-02-10]. Dostupné z: <http://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cisloclanku=2008011702>
22. Učební text: *Teoretický úvod k cvičení z předmětu Technologie I*. In: Fsid.cvut.cz [online]. Praha, 2005 [cit. 2015-12-09]. Dostupné z: http://u12133.fsid.cvut.cz/podklady/TE1/def_kontrola_sv.pdf
23. Dakel.cz: Snímač AE [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/sens/idk09>
24. Dakel.cz: Předzesilovače [online]. [cit. 2016-03-25]. Dostupné z: <http://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/amp/preamp>
25. Kuhlreiber.cz: Mig/Mag poloautomaty [online]. [cit. 2016-03-27]. Dostupné z: <http://www.kuhlreiber.cz/mig-mag.html>

8. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1: Průběh teplotních cyklů čtyřvrstvého svaru	12
Obr. 2: Tvar svarové lázně a směr růstu dendritů	13
Obr. 3: Části svarového spoje a jejich názvy	14
Obr. 4: Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje	14
Obr. 5: Rozdělení metod svařování kovů	15
Obr. 6: Zařízení pro svařování plamenem	16
Obr. 7: Rozdělení kyslíko - acetylenového plamene dle poměru acetylenu a kyslíku ...	17
Obr. 8: Průřez obalenou elektrodou	19
Obr. 9: Svařovací zařízení pro svařování obalenou elektrodou	19
Obr. 10: Princip svařování tavící se elektrodou MIG/MAG	20
Obr. 11: MIG/MAG - Svařovací zařízení	21
Obr. 12: TIG/WIG - Svařovací zařízení	22
Obr. 13: Povrchové (viditelné) vady svarů	24
Obr. 14: Vnitřní vady svarů	24
Obr. 15: Mikrotrhlina ve svaru	25
Obr. 16: Studený spoj a rozstřík	26
Obr. 17: Zápaly	26
Obr. 18: Vizuální kontrola - měrky	29
Obr. 19: Ohebný endoskop	29
Obr. 20: Znázornění vady při kapilární zkoušce	31
Obr. 21: Znázornění vady při zkoušce magnetické práškové	32
Obr. 22: Schéma analogového ultrazvukového defektoskopu	33
Obr. 23: Rentgenový obraz trhliny ve svaru	34
Obr. 24: Praskavý a spojitý signál AE	36
Obr. 25: Šíření pulsu AE pomocí paprsků a vlnoploch	37
Obr. 26: Zařízení pro měření akustické emise	41
Obr. 27: Příprava vzorků	43
Obr. 28: Příprava a umístění snímače na vzorek	43
Obr. 29: Ochrana snímače na vzorku z materiálu 90MnCrV8	44

Obr. 30: Nastavené parametry pro svařování	44
Obr. 31: Průběh svařování vzorku z materiálu 90MnCrV8.....	45
Obr. 32: Průběh měření AE	45
Obr. 33: Svařené vzorky	46
Obr. 34: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 1 z materiálu S235JRC.....	46
Obr. 35: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 2 z materiálu S235JRC.....	47
Obr. 36: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 3 z materiálu S235JRC.....	47
Obr. 37: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 4 z materiálu S235JRC.....	47
Obr. 38: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 1 z materiálu 90MnCrV8....	48
Obr. 39: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 2 z materiálu 90MnCrV8....	48
Obr. 40: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 3 z materiálu 90MnCrV8....	49
Obr. 41: Záznam akustické emise při svařování vzorku č. 4 z materiálu 90MnCrV8....	49
Obr. 42: Hydraulický lis OMA 655	49
Obr. 43: Vzorek z materiálu S235JRC před/po zkoušce	50
Obr. 44: Vzorek z materiálu 90MnCrV8 před/po zkoušce.....	50
Obr. 45: Metalografický výbrus vzorku z materiálu S235JRC	51
Obr. 46: Metalografický výbrus vzorku z materiálu 90MnCrV8	52
Obr. 47: Porovnání svařenců obou typů ocelí při vizuálním hodnocení	53
Obr. 48: Zviditelnění přechodové oblasti (TOO)	53
Obr. 49: Ukázka typické hodnoty zatěžovacího tlaku u oceli 90MnCrV8.....	54
Obr. 50: Masivní rozstřík svarového kovu a poloha štěpné trhliny.....	55
Obr. 51: Zvlnění lomové plochy při nerovnoměrném působení tlakového zatížení	55
Obr. 52: Porušení svaru při přípravě vzorku.....	56
Obr. 53: Typický záznam výsledného tlaku u oceli S235JRC	56
Obr. 54: Plastická deformace svařence z materiálu S235JRC.....	57
Obr. 55: Porovnání typu poškození u zkoušených vzorků	57

9. SEZNAM TABULEK

Tab. 1: Skupiny tavné svažitelnosti	11
Tab. 2: Ocel S235JRC	39
Tab. 3: Ocel 90MnCrV8	40
Tab. 4: Předzesilovač akustické emise - technické parametry.....	41
Tab. 4: Snímač akustické emise IDK-09 - technické parametry	42
Tab. 5: Svářečka KIT 305 - technické parametry	42