



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

NEDESTRUKTIVNÍ ZKOUŠENÍ SVARŮ

NON-DESTRUCTIVE TESTING OF WELDS

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Jan Šaloun

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jaroslav Kubíček

BRNO 2021

Zadaní bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Student:	Jan Šaloun
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Jaroslav Kubíček
Akademický rok:	2020/21

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:

Nedestruktivní zkoušení svarů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Svarové spoje jsou náročné z hlediska kvality. Nedestruktivní zkoušení je jednou z metod důležité kontroly jakosti z hlediska povrchových a objemových vad svarů. Existuje celá řada metod založených na fyzikálních základech – zkoušky ultrazvukem, prozáření i vizuálních – penetrační, vizuální kontrola. V bakalářské práci je provedena studie možných technologií zkoušení a experimentální ověření svarového spoje vybranými technikami zkoušek.

Cíle bakalářské práce:

- literární studie vybraných NDT metod pro zkoušky svarů,
- shrnutí jejich možností použití, výhody a nevýhody,
- provedení vybraných NDT metod na vzorku svaru,
- porovnání praktických výsledků s teorií.

Seznam doporučené literatury:

KOPEC, Bernard a kolektiv. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, 1. vyd. CERN s.r.o. Brno 2008, ISBN 978-80-7204-591-4.

KOLEKTIV AUTORŮ. Materiály a jejich svařitelnost, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2001, 292 s. ISBN 80-85771-85-3.

KOLEKTIV AUTORŮ. Technologie svařování a zařízení, 1.vyd. Zeross, Ostrava 2001, 395s. ISBN 80-85771-81-0.

KOLEKTIV AUTORŮ. Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení, 1. vyd. Zeross, Ostrava 1999, 249 s. ISBN 80-85771-70-5.

KOLEKTIV AUTORŮ. Výroba a aplikované inženýrství ve svařování, 1. vyd. Zeross, Ostrava 2000, 214 s. ISBN 80-85771-72-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

ŠALOUN Jan: Nedestruktivní zkoušení svarů

Bakalářská práce se zabývá problematikou nedestruktivního zkoušení (NDT) tavných svarů kovů. V práci je provedena rešerše pěti základních metod zkoušení – vizuální, magnetické práškové, ultrazvukové, prozařovací a kapilární. U metod je rozebrán princip, postup zkoušení a jejich vyhodnocování. Jednotlivé metody jsou mezi sebou porovnány. V experimentální části práce byly zhotoveny dva svarové vzorky a následně otestovány vybranými metodami. Pro ověření správnosti indikovaných vad byly vytvořeny metalografické výbrusy vzorků. V závěru práce jsou porovnány praktické výsledky s teorií.

Klíčová slova: NDT, nedestruktivní zkoušení, vady svarů, metalografický výbrus, svary

ABSTRACT

ŠALOUN Jan: Non-destructive testing of welds

This thesis describes non-destructive testing (NDT) of fusion welds of metals. There are five fundamental methods of NDT discussed in the theoretical part – visual and magnetic particle inspection, ultrasonic, radiography and penetrant testing. Principles of methods, examining procedures and their evaluations are described. The methods are compared with each other. In the experimental part of the thesis two samples of welding joints were welded and tested by selected methods. To verify correctness of the indicated defects, metallographic samples were made. At the conclusion practical results are compared with theoretical statements.

Keywords: NDT, non-destructive testing, weld defects, metallographic sample, welds

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠALOUN, Jan. *Nedestruktivní zkoušení svarů* [online]. Brno, 2021 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132395>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. Vedoucí práce Jaroslav Kubíček.

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 Brně dne 20. 5. 2021

Jan Šaloun

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji panu Ing. Jaroslavu Kubíčkoví za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále děkuji firmám Ecos Choceň s.r.o. a Tesydo, s.r.o., za pomoc s experimentální částí práce.

Děkuji také své přítelkyni a rodině za podporu při dosavadním studiu.

OBSAH

Zadání
Abstrakt
Bibliografická citace
Čestné prohlášení
Poděkování
Obsah

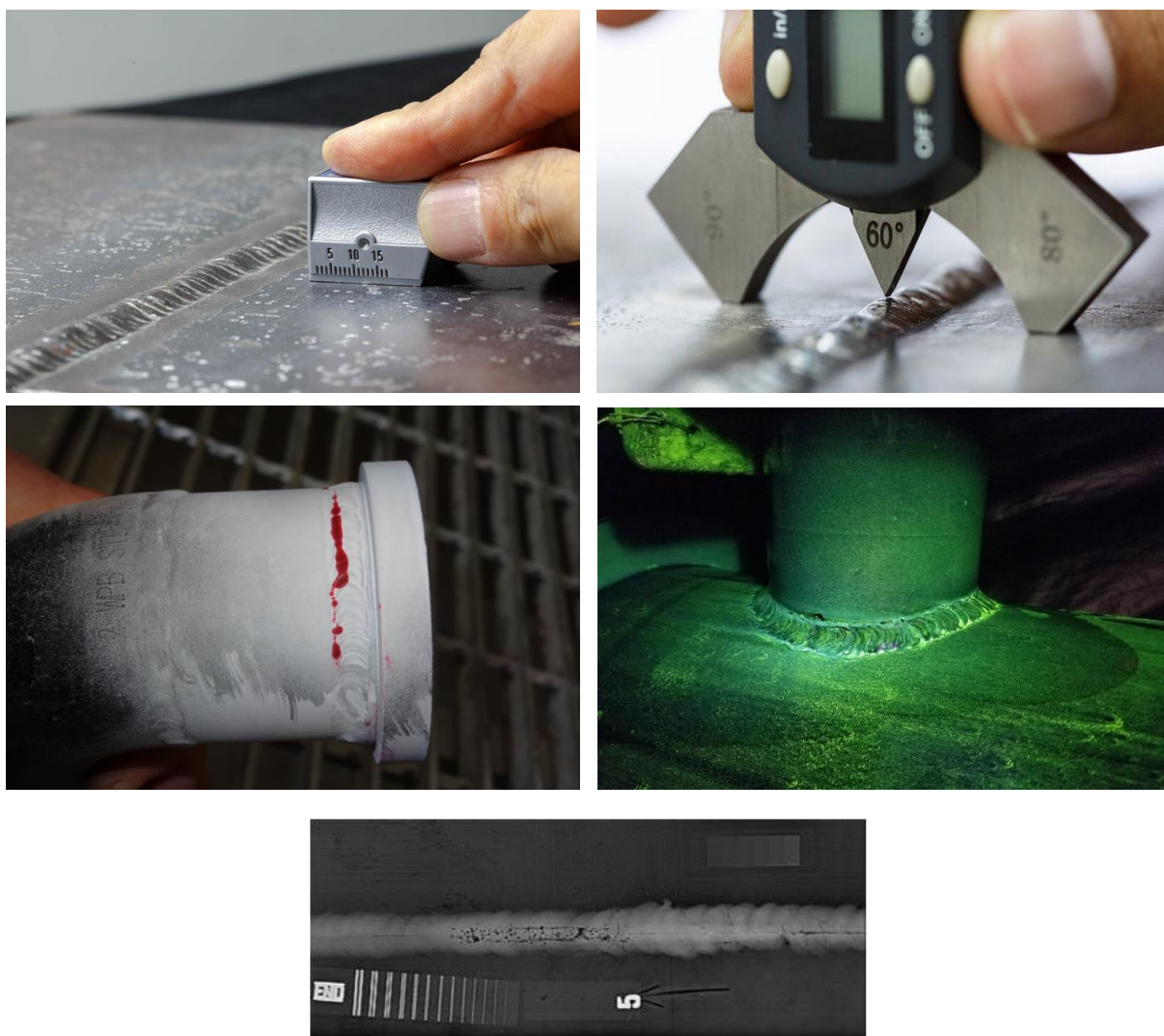
ÚVOD	9
1 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ.....	10
1.1 Vady tavných svarů	10
1.2 Metody NDT	11
1.2.1 Vizualní metoda.....	11
1.2.2 Kapilární metoda.....	12
1.2.3 Magnetická prášková metoda	14
1.2.4 Ultrazvukové metody	15
1.2.5 Prozařovací metody	18
1.2.6 Shrnutí metod zkoušení.....	20
1.3 Kvalifikace pracovníků NDT	20
2 EXPERIMENT.....	21
2.1 Specifikace svařovaných plechů	21
2.2 Metody zkoušení.....	22
2.2.1 Vizualní zkouška.....	22
2.2.2 Kapilární zkouška	23
2.2.3 Magnetická zkouška.....	24
2.2.4 Zkoušení prozařováním	25
2.3 Výbrusy vzorků	27
3 ZÁVĚRY	29

Seznam použitých zdrojů
Seznam použitých symbolů a zkratk
Seznam obrázků
Seznam tabulek
Seznam příloh

ÚVOD [1], [2], [3], [4], [5], [6]

Ve strojírenství má kvalita výrobků důležitou roli. V současnosti je samozřejmostí, že výrobce zákazníkovi dokládá požadovanou jakost produktu na základě prozkoumání bezvadnosti vnitřní struktury či povrchu. Po dlouhá léta nebylo možné zjištění výskytu vnitřních vad ve výrobcích jinak než jejich destrukcí – rozřezáním. Fyzikální zákony popsané v průběhu 19. a na počátku 20. století položily základ novému vědnímu oboru, defektoskopii, a výrobci začali být schopni s použitím rozličných testovacích metod deklarovat požadovanou kvalitu, aniž by museli výrobky zkoušením znehodnocovat. Nedestruktivní testování je možno použít v široké škále oblastí, například při zkoumání vad v hutních polotovarech, v odlitcích, výkvcích či ve svařech.

Náplní práce je shrnutí problematiky vad svarových spojů kovů, konkrétně diskontinuit tavných svarů, s pomocí vybraných defektoskopických metod. V práci je popsán princip a průběh zkoušení pěti základními metodami spolu se systémem hodnocení vad a jejich indikací dle platných norem. V experimentu je problematika aplikována na konkrétní vzorky a jsou ověřeny teoretické předpoklady.



Obr. 1 Nedestruktivní zkoušení svarů [2], [3], [4], [5], [6]

1 NEDESTRUKTIVNÍ TESTOVÁNÍ [1], [7]

Nedestruktivní zkoušení (NDT), též nazývané defektoskopie, má nezpochybnitelnou úlohu při kontrole kvality rozličných materiálů a výrobků, protože s jeho pomocí lze relativně rychle rozpoznat vady v materiálu, aniž by došlo k poškození zkoumaného předmětu a narušení jeho funkčnosti. Různými defektoskopickými metodami se určuje přítomnost vad na základě fyzikálních jevů, jako jsou vzlínání, magnetismus, ultrazvukové vlnění nebo rentgenové záření aj.

1.1 Vady tavných svarů [1], [7], [8], [9], [10], [11]

Diskontinuity ve svarových spojích vznikají nedodržením správného postupu svařování. I při lehkém odklonění od ideálního průběhu může vzniknout vada, z čehož plyne, že se při běžné výrobě vyskytnou vždy. Mohou se nacházet přímo v místě svarového spoje, a také v tepelně ovlivněné oblasti.

Vady svarů způsobují odchýlení od ideálního průběhu napětí, které se v diskontinuitách lokálně koncentruje. Tenze může vyvolat deformaci a vést k porušení spoje. K prevenci selhání svarových spojů je důležité umět identifikovat vady a správně vyhodnotit jejich riziko.

K posouzení přípustnosti vad ocelových, niklových či titanových svarů vzniklých metodami tavného svařování, kromě elektronového a laserového, slouží norma ČSN EN ISO 5817. Jedná se například o svařování obalovanou elektrodou (MMA), netavící se elektrodou (TIG) a tavící se elektrodou (MIG, MAG), případně o svařování pod tavidlem (SAW) a svařování plamenem. Svary vzniklé laserovým a elektronovým svařováním se hodnotí normami ČSN EN ISO 13919-1 a 2. Pro svary vytvořené obloukovým svařováním hliníku či jeho slitin definuje přípustnost vad norma ČSN EN ISO 10042. Normy dělí vady svarů do tří stupňů kvality – B, C, D. Stupeň jakosti je předepsaný pro jeden konkrétní svar, ale je možné na jedné konstrukci předepsat pro jednotlivé svary rozdílné kvalitativní stupně. Jakost svarů je ověřována NDT metodami, u nichž se na základě požadovaného stupně kvality spoje volí stupeň přípustnosti vad či jejich indikací dle normy ČSN EN ISO 17635.

Klasifikací a popisem vad svarových spojů vyskytujících se při tavném svařování kovových materiálů se zabývá norma ČSN EN ISO 6520-1, podle níž se dělí do šesti skupin:

- Trhliny (1) – patří k nejnebezpečnějším vadám, protože při jejich výskytu ve svarovém spoji je vysoké riziko lomu. Dle momentu vzniku jsou rozlišovány trhliny:
 - za tepla – vznikají při tuhnutí taveniny za vysokých teplot,
 - za studena – objevují se při teplotách pod 200–300 °C,
 - lamelární – jsou způsobeny namáháním materiálu ve směru jeho tloušťky,
 - žíhací – mohou se vyskytnout při žíhání či při tvorbě vícevrstvých spojů.
- Dutiny (2) – jsou díky jejich oblému tvaru menšími koncentrátory napětí než trhliny. Obvykle se lze setkat ve svarech s póry, což jsou dutiny vzniklé zатуhnutím tekutého kovu dříve, než stihl z místa uniknout plyn. Jejich výskyt ve svaru je ovlivněn množstvím ochranné atmosféry při svařovacím procesu a čistotou svarových ploch. Mezi dutiny se řadí též staženiny, které jsou protáhlejšího tvaru než póry a vznikají smršťováním kovu při tuhnutí.
- Pevné vměstky (3) – představují objemové vady vzniklé vyplněním části svaru jiným než svarovým materiálem. Tím mohou být neodstraněné části strusky, úlomky wolframu při svařování metodou TIG, případně vměstky oxidů s vysokou teplotou tavení. Z hlediska napětí mají stejný účinek jako dutiny v případě, že jsou oblé. Pokud mají ostré hrany, výrazně se zvyšuje jejich vrubový účinek.
- Studené spoje a neprůvazy (4) – patří k významným koncentrátorům napětí. Studený spoj vzniká nedostatečným natavením mezi základním materiálem a svarovým kovem. Může se tak stát z důvodu nízkého svařovacího proudu, špatného úhlu svařování či velké svařovací rychlosti. Neprovařený kořen je vytvořen nenatavením základního materiálu

v kořenové oblasti svaru, například z důvodu malé mezery mezi svařovanými dílci, případně volbou nízkého svařovacího proudu.

- Vady tvaru a rozměru (5) – jsou odchylky svaru od předepsané geometrie. Jedná se o vruby, nadměrné průvary kořenů, prolákliny, přesazení, výrazné převýšení svarů a další nepravidelnosti.
- Jiné vady (6) – nejsou definovány v žádné z předchozích pěti kategorií. Do této skupiny patří rozstřík svarového kovu, dotyk elektrody mimo svarovou mezeru či vrypy vzniklé broušením.

Pro účely defektoskopického testování se dále vady dělí podle:

- umístění ve svarovém spoji:
 - povrchové – nachází se na povrchu,
 - vnitřní – jsou uvnitř svaru;
- tvaru:
 - plošné – trhliny, studené spoje,
 - objemové – vměstky, póry.

1.2 Metody NDT [7], [9]

Defektoskopické metody zkoušení lze rozdělit do dvou skupin. Jednu tvoří ty, pomocí nichž se odhalují vnitřní vady v materiálech, druhou představují metody sloužící k detekci povrchových či mírně podpovrchových diskontinuit. Vnitřní vady jsou zjistitelné pomocí metod ultrazvukových (UT) či prozařovacích (RT). Povrchové nebo mírně podpovrchové vady se detekují metodami vizuálními (VT), kapilárními (PT) a magnetickými práškovými (MT).

Při testování svarů se nepoužívají vždy veškeré metody, ale podle normy ČSN EN ISO 17635 jsou vybrány konkrétní z nich na základě tloušťky a materiálu svaru. Kombinace více metod je pro řádné prozkoušení svaru nezbytná, jelikož žádnou z nich nelze správně vyhodnotit kvalitu povrchu a zároveň vnitřní strukturu svaru.

1.2.1 Vizuální metoda [9], [12], [13], [14]

Testování vizuálním způsobem je základním typem kontroly kvality povrchu svaru. Využívá se viditelné oblasti elektromagnetického záření, pomocí níž jsou přesně lokalizovány povrchové vady – trhliny, odchylky od geometrie svarových spojů, neprovařené kořeny aj.

Norma ČSN EN ISO 17637 specifikuje vizuální kontrolu tavných svarů kovových materiálů a rozděluje ji na dva druhy:

- Přímá – je podmíněna nepřetržitým kontaktem mezi okem hodnotící osoby a zkoumaným svarem. Pro správné hodnocení povrchu musí být dodržena intenzita osvětlení alespoň 350 lx, maximální vzdálenost oka a svaru 600 mm a úhel pohledu musí být vůči povrchu větší než 30°. Využívány jsou pomůcky na přiblížení zkoumané oblasti (lupy, mikroskopy), posuvná měřidla či speciální svarové měrky (obr. 2).
- Nepřímá – aplikuje se v případech, kdy nelze svarový spoj zkoumat prvně zmíněnou cestou, například u svarů uvnitř potrubí a nádrží. Pomůckami pro kontrolu jsou optické přístroje – endoskopické kamery (obr. 3).

Před samotnou zkouškou musí být povrch zkoumaného svaru a jeho blízké okolí pečlivě očištěny od rozstříku, mastnoty a jiných nečistot. Pracovník následně prohlédne oblast povrchu spoje přímou či nepřímou metodou, identifikuje vady a s pomocí měřicích pomůcek zjistí jejich rozměry. Veškeré nalezené vady dle ČSN EN ISO 6520-1 musí být zaneseny do protokolu o zkoušce spolu s hodnocením, zda vyhovují zvolenému stupni jakosti svaru dle příslušných norem.



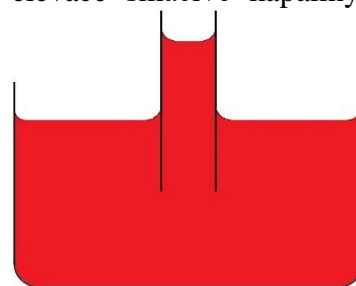
Obr. 2 Svarová měrka [13]



Obr. 3 Endoskopická kamera [14]

1.2.2 Kapilární metoda [7], [15], [16], [17], [18]

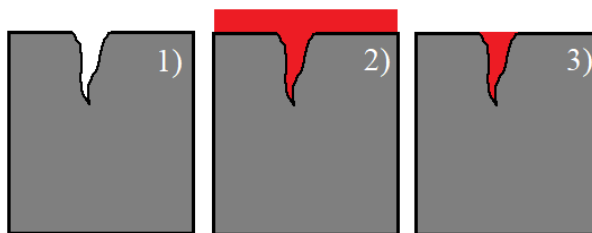
Zkoušení touto metodou je založeno na využití kapilární elevace smáčivé kapaliny, viz obr. 4. K ní dochází v úzkých otvorech působením kapilárního tlaku vyvolaného napětím povrchové vrstvy kapaliny. Smáčivá kapalina snadno zatéká do povrchových nečelivostí a její následné vztlínání je podpořeno nanesením pomocného média (vývojky), které kapalinu absorbuje. Pro kapilární zkoušení je kromě penetrantu a vývojky potřeba i čistič povrchu. Všechny tři prostředky by měly mít stejného výrobce. Penetranty existují barevné a fluorescenční. Dále se rozlišují vodou smytelné (obsahují emulgátory) a nesmytelné. Vývojky jsou děleny na suché, mokré vodné a mokré nevodné.



Obr. 4 Kapilární elevace kapaliny

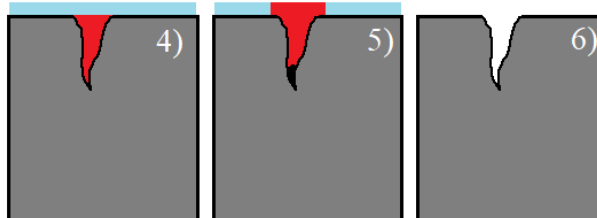
Průběh zkoušení se řídí podle normy ČSN EN ISO 3452-1 a je znázorněn na obr. 5 a 6:

- Prvotní fázi – je úprava zkoušeného povrchu, který musí být hladký, odmaštěný a suchý v dostatečném rozsahu od samotného svaru (obr. 5, krok 1).
- Aplikace penetrantu – může proběhnout nástřikem, ponorem, nátěrem či elektrostaticky v závislosti na rozsahu a přístupnosti testovaných míst. Je jej třeba nanést v rovnoměrné vrstvě (obr. 5, krok 2).
- Penetrační čas – pohybuje se v rozmezí 5 až 60 minut v závislosti na použitém typu kapaliny, velikosti vad, teplotě povrchu vzorku, případně dle specifických požadavků zákazníka.
- Odstranění přebytečné kapaliny čističem – musí být šetrné, aby nedošlo k vyplavení penetrantu z dutin, ale co nejdůkladnější, jinak dojde ve finálním kroku k zobrazení falešných indikací, které zkomplikují hodnocení zkoušky (obr. 5, krok 3).



Obr. 5 Průběh penetračního zkoušení 1

- Vývojka – musí být na vysušený povrch nanášena v tenké vrstvě, protože širší by nepříznivě ovlivnila rozměry následných indikací (obr. 6, krok 4).
- Vyvíjecí čas – tedy doba mezi nanášením vývojky a hodnocením indikací vad, je dle normy 10 až 30 minut (obr. 6, krok 5). Při vyvíjení dochází k zobrazení indikací vad rozpuštěním penetrantu ve vývojce.
- Hodnocení zkoušky – probíhá ve více krocích. V první fázi je potřeba ihned po zaschnutí nanášené vývojky zaznamenat výrazné indikace, jejichž tvar by byl při pozdějším záznamu zkreslen přílišným rozpítním vývojky. Tyto indikace jsou způsobeny otevřenými vadami, v jejichž objemu je nashromážděno větší množství penetrantu. Druhým krokem hodnocení je kompletní kontrola rozměrů a tvarů indikací po uplynutí vyvíjecího času. Podmínky prohlížení specifikuje norma ČSN EN ISO 3059. Při použití barevných penetrantů je při hodnocení požadována intenzita světla na zkoušeném povrchu alespoň 500 lx. Neměla by být výrazně vyšší, aby zkoušející osobu světlo neoslňovalo. Indikace vytvořené fluorescenčními penetranty jsou viditelné pouze pod UV zářením, které má menší vlnovou délku než viditelná oblast spektra záření. Při jeho dopadu na povrch fluorescentu je emitováno žlutozelené záření, jež okem viditelné je. Prohlížení svaru s aplikovaným fluorescenčním penetrantem probíhá v temné komoře s intenzitou osvětlení maximálně 20 lx. Intenzita UV záření na povrchu vzorku by měla být minimálně $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$.



Obr. 6 Průběh penetračního zkoušení 2

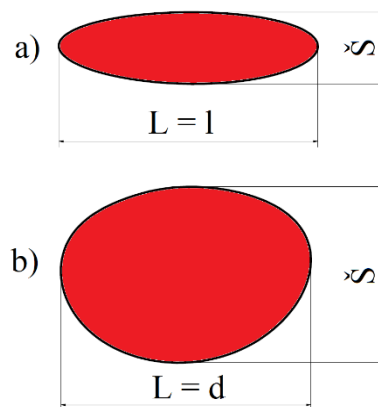
Indikace se rozdělují na dvě skupiny podle hodnot poměru délky L a šířky \check{S} :

- lineární indikace $L > 3 \cdot \check{S}$ (obr. 7, a)
 - charakteristický rozměr 'l'
- nelineární indikace $L \leq 3 \cdot \check{S}$ (obr. 7, b)
 - charakteristický rozměr 'd'

Posuzovaný svar má předepsaný stupeň kvality dle norem. Na jeho základě se zvolí stupeň přípustnosti indikací vad dle ČSN EN ISO 23277, která udává jejich maximální povolené rozměry. Velikosti a pozice indikovaných necelistvostí ve spoji se zaznamenají do protokolu o zkoušce. Na základě porovnání získaných rozměrů s největšími přípustnými je rozhodnuto o přípustnosti, či nepřípustnosti indikací.

- Důkladné očištění vzorku od vývojky a zbylého penetrantu – je posledním krokem a provádí se pro případ dalšího zkoušení (obr. 6, krok 6).

Z podstaty metody je patrné, že umožňuje indikaci povrchových vad, v nichž se může zachytit penetrant. Jedná se o staženiny, dutiny, trhliny a vruby. Kapilární zkoušení je levné, citlivé, rychle proveditelné a výhodu skýtá možnost jeho použití i na složitě tvarované konstrukce. Nevýhodou představuje velké riziko vzniku falešných indikací nezkušeností technika či nedodržením zkušebního postupu, a nemožnost určit hloubku vad.



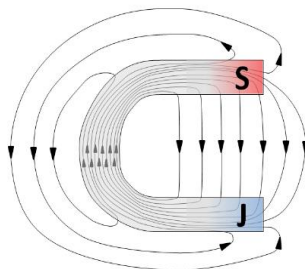
Obr. 7 Indikace vad

1.2.3 Magnetická prášková metoda [1], [7], [19], [20], [21], [22], [23], [24]

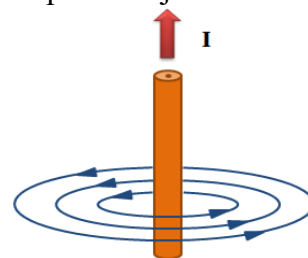
Zkoušení je postaveno na využití magnetismu, tedy jevu, při kterém jsou magnetické materiály silově ovlivňovány působením magnetického pole (MP). Magnetické materiály se dělí na magneticky tvrdé (permanентní magnety), které si magnetické vlastnosti uchovávají i po odstranění vnějšího MP, a magneticky měkké materiály (feromagnetické látky), jež získávají magnetické vlastnosti pouze během působení externího pole vyvolaného jiným magnetem či průtokem elektrického proudu. Permanentní magnety jsou vyráběny např. ze slitin AlNiCo, NdFeB. Feromagnetickými kovy jsou železo, nikl či kobalt.

Silové účinky MP se znázorňují myšlenými uzavřenými křivkami – magnetickými siločárami. U magnetů jsou orientovány mezi jižním a severním pólem, v nichž se soustředí největší silové účinky. Směr siločar u vodičů s procházejícím elektrickým proudem se určuje dle Ampérova pravidla. Orientace siločar u magnetu a u vodiče s proudem znázorňuje obr. 8, respektive obr. 9.

Existuje více zdrojů MP. Použity mohou být buď permanentní magnety se stálým polem, nebo lze využít elektromagnety (jha), příložné elektrody či cívky, v nichž se pole indukuje až při průchodu proudem. Příložením zdroje ke vzorku začne procházet MP i vzorkem samotným. Pole lze charakterizovat magnetickým tokem, vyjadřujícím počet siločar procházejících danou plochou. V místech s vyskytujícími se diskontinuitami je přímý průchod toku blokován a dochází k jeho odchýlení kolem hran vad. Siločáry vedoucí kolem spodních hran diskontinuit se odklání do materiálu, zbývající se odchylují přes horní okraje vad. V případě, že se dostanou nad povrch materiálu, vytvoří na hranách diskontinuit póly, mezi nimiž vznikají magnetická rozptylová pole, viz obr. 10.



Obr. 8 Orientace siločar MP u magnetu [23]

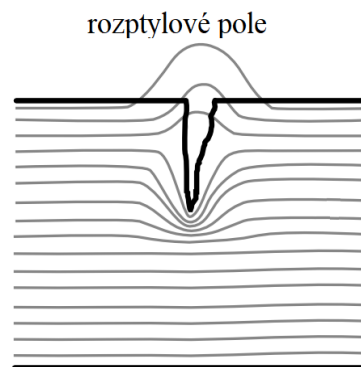


Obr. 9 Orientace siločar MP u vodiče s proudem [23]

Jednotlivé kroky zkoušení svarů práškovou metodou se řídí normou ČSN EN ISO 17 638:

- Očištění zkoumaných ploch – od mastnoty, rzi, prachu a jiných nežádoucích látek.
- Magnetizace svaru – pólově (podélně) nebo cirkulárně (proudově). Pomocí pólového způsobu se detekují příčné vady za použití elektromagnetického jha, magnetovací cívky nebo permanentního magnetu. Trvalý magnet se běžně nepoužívá, protože jeho MP nemá dostatečnou intenzitu. Cirkulární magnetizace vzniká přímým průchodem proudem materiálem. Umožňuje detekci podélných vad u rotačních součástí. Magnetizační proudy jsou používány střídavé a usměrněné. Střídavý proud detekuje zejména necelistvosti na povrchu, usměrněné proudy (jednocestně, dvoucestně) odhalují povrchové i podpovrchové vady.
- Detekce indikací – může probíhat ručně či automatizovaně. Při ručním zkoušení jsou používány detekční prášky, které obsahují drobné feromagnetické částice. Jejich kumulací na pólech rozptylových polí dochází k indikacím vad. Citlivost detekčních prášků musí být ověřena citlivostními měrkami (Bertholdovou, MTU3 měrkou). Automatizované zkoušení využívá pro detekci rozptylových polí snímacích sond. Indikace vad se dělí na lineární a nelineární, viz obr. 7.

- Ruční prohlížení indikací – se při použití fluorescenčních suspenzí uskutečňuje pod UV lampou. Při použití barevných suspenzí jsou indikace viditelné přímo. Světelné podmínky ručního prohlížení specifikuje táž norma jako u PT, tedy ČSN EN ISO 3059. Suspenze je nanášena vždy na již zmagnetizovaný úsek vzorku. Posuzování přípustnosti indikací probíhá dle ČSN EN ISO 23278. Na základě požadovaného stupně kvality svaru je zvolen daný stupeň přípustnosti, který udává maximální povolené rozměry indikací. Ty jsou zaneseny do protokolu o zkoušce a je vyhodnocena jejich přípustnost.
- Demagnetizaci vzorku – je nezbytné provést po ukončení zkoušení především při použití usměrněných magnetizačních proudů. Odstranění zbytkového magnetismu se provádí ručními demagnetizéry nebo v demagnetizačních tunelech.



Obr. 10 Rozptylové pole na vadě [24]

Metoda je rychle proveditelná, lze pomocí ní zachytit indikace vad plošných povrchových a mírně podpovrchových, především trhlin, ale je nutné, aby se směrem magnetického toku svíraly úhel blízký 90°. Použitelná je pouze u spojů feromagnetických kovů, ale magnetické pole dokáže projít i přes magneticky nevodivou vrstvu (až 40 μm). Nesprávným postupem zkoušení hrozí zobrazení falešných indikací. Po ukončení zkoušky je nutné odstranit zbytkový magnetismus.

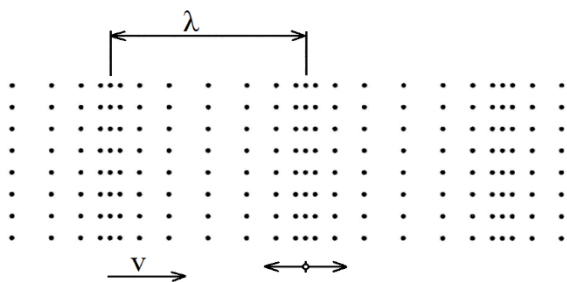
1.2.4 Ultrazvukové metody [1], [7], [9], [25], [26], [27], [28]

Testování je založeno na změně vlastností akustického ultrazvukového vlnění při průchodu materiálem. K té dochází na rozhraní prostředí s odlišnými zvukovými vlastnostmi – materiálu a vady. Ultrazvukové vlnění je lidským uchem neslyšitelné a dosahuje minimálně frekvence 20 kHz. Šířením ultrazvukové vlny vzniká v materiálu akustický tlak, který charakterizuje tlakové působení vlny na částice. S uraženou vzdáleností jeho hodnota klesá, dochází k útlumu vlnění. Platí, že se vzrůstající frekvencí vlnění se zlepšuje rozlišitelnost vad, roste útlum a snižuje se mrtvá zóna, která značí oblast, v níž jsou vady nedetekovatelné. Frekvence vlnění je dána rovnicí 1.1:

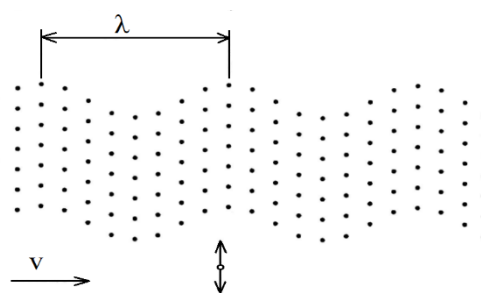
$$f = \frac{v}{\lambda} \quad (1.1)$$

kde: f – frekvence vlnění [Hz]
 v – rychlost vlnění [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
 λ – vlnová délka vlnění [m]

Vlnění jsou klasifikována podle směru kmitání částic. Pro zkoušení svarů ultrazvukem (UT) jsou významná vlnění podélná a příčná. U podélného částice kmitají ve směru šíření vlnění (obr. 11), při příčném kmitají kolmo na směr šíření (obr. 12). Podélné vlny se šíří ve všech



Obr. 11 Podélné vlnění [1]



Obr. 12 Příčné vlnění [1]

prostředích a jejich rychlost je větší než rychlost vln příčných, které se navíc mohou šířit pouze v pevných látkách.

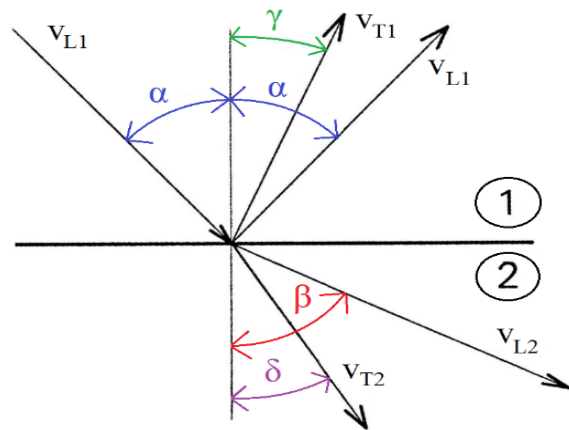
Při dopadu podélné vlny na rozhraní prostředí (materiál–vada) nastává její lom a částečný odraz. Navíc se část vlny mění na příčnou, jež se také ohýbá a láme. Na rozhraní vznikají celkem čtyři nové vlny. Závislosti úhlů a rychlostí vln jsou zobrazeny na obr. 13 a popsány Snellovým zákonem:

$$\frac{\sin \alpha}{v_{L1}} = \frac{\sin \beta}{v_{L2}} = \frac{\sin \gamma}{v_{T1}} = \frac{\sin \delta}{v_{T2}} \quad (1.2)$$

kde: $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ – úhly dopadů, lomů a odrazů vln [°]
 v_{L1}, v_{L2} – rychlost podélné odražené, resp. podélné lomené vlny [$m \cdot s^{-1}$]
 v_{T1}, v_{T2} – rychlost příčné odražené, resp. příčné lomené vlny [$m \cdot s^{-1}$]

Pokud je dosaženo kritických úhlů dopadu, dochází k vymizení podélných (1. kritický úhel) či příčných (2. kritický úhel) lomených vln. Při srovnatelných velikostech vlnové délky a rozhraní nastává kromě lomu a odrazu i ohyb vlnění.

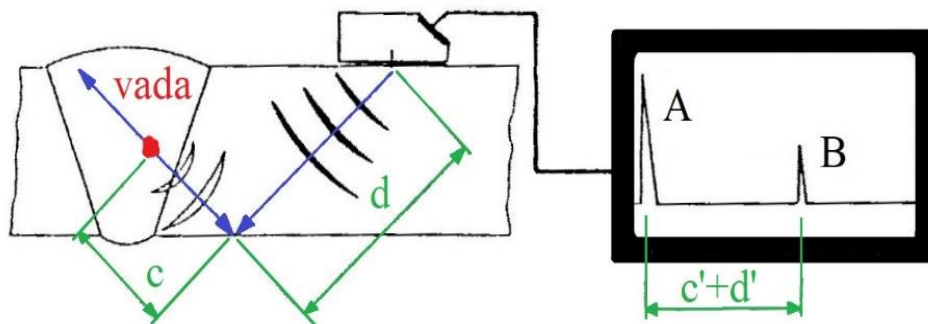
Pro generování a příjem vlnění jsou používány sondy obsahující piezoelektrické krystaly, které jsou schopny měnit elektrickou energii na mechanické kmitání a naopak. V základu se sondy dělí na přímé, úhlové (45°, 60°, 70°) a dvojité, které slouží jako vysílač a přijímač zároveň. Signál zpracovaný detektorem je možné prohlížet několika typy zobrazení – scany A, B, C, D a S.



Obr. 13 Rozhraní prostředí [1]

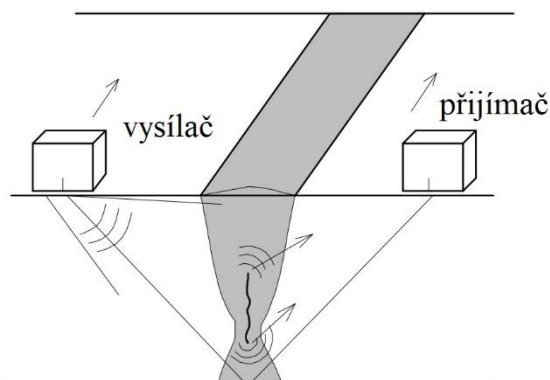
Svarové spoje feritických ocelí jsou zkoušeny zejména pomocí tří technik:

- Odrazová – je aplikovaná nejčastěji. Za použití úhlových sond jsou do materiálu vysílány pulzní vlny, jejichž průběh je sledován na obrazovce. Na ní je postupně v čase zobrazen počáteční impuls A a echo od vady B. Amplitudy jsou od sebe ve vzdálenosti $c' + d'$, která je úměrná skutečné dráze impulsu $c + d$. Celé schéma zkoušení zobrazuje obr. 14. Této techniky se využívá pro kontrolu plně provařených svarů o tloušťce minimálně 8 mm.

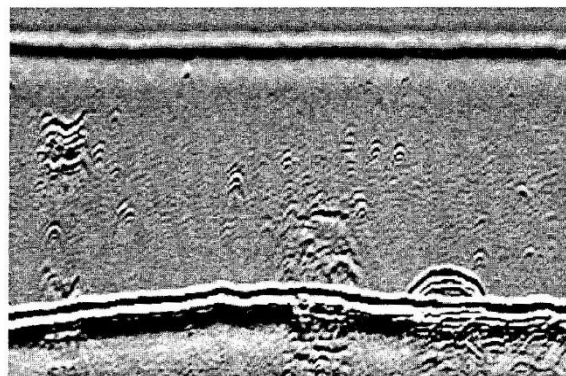


Obr. 14 Zkoušení odrazovou technikou [7]

- TOFD – využívá dvou protilehlých úhlových sond – vysílače a detektoru. Při kontaktu podélných vln s plošnou vadou dochází na jejích okrajích k difrakci (ohybu) vln, jež jsou snímány detektorem (obr. 15). Poloha a tvar vady jsou určeny z časových rozdílů zachycených signálů (obr. 16). Technika je využívána pro kontrolu svarů tlakových nádob a potrubí, případně tupých svarů různých tloušťek. Její výhodou je vysoká citlivost detekce vad a možnost automatizace techniky, která vede ke zvýšení rychlosti zkoušení.

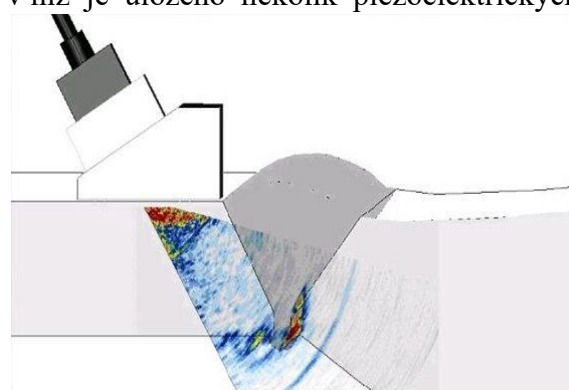


Obr. 15 Zkoušení TOFD technikou [27]



Obr. 16 Indikace vad pomocí TOFD [1]

- Phased Array – používá speciální sondu, v níž je uloženo několik piezoelektrických měničů, které jsou rozděleny do skupin. Každá skupina měničů vysílá vlnění pod jiným úhlem a v odlišný čas, díky čemuž dochází ke kompletnímu prozkoušení dané části svaru bez nutnosti měnit polohu sondy (obr. 17). Zkoušení je velmi citlivé na detekci vad, automatizovatelné, rychle proveditelné a záznam signálů je možné hodnotit v úhlovém zobrazení typu S. Indikované vady jsou relevantní při tloušťce svaru minimálně 6 mm.



Obr. 17 Phased Array technika [28]

Postup provedení zkoušky se liší v závislosti na zvolené technice zkoušení, ale některé prvky mají všechny společné. Před zahájením testování je nutné zbavit zkoumaný povrch nečistot a nerovností, pomocí kalibračních a srovnávacích měrek upravit nastavení sond a zkontrolovat základní materiál v okolí svaru, zda se v něm nevyskytují vady, které by mohly zkreslit výsledky zkoušky. Vždy je důležité nanést na zkoušený povrch látku, která umožní hladký průchod vlnění ze sondy do materiálu. Jako kontaktní prostředky se používají vazelíny, oleje a gely. Ze scanů svarů jsou analyzovány indikace vad. Veškeré zjištěné indikace včetně posouzení přípustnosti s požadovanou kvalitou se zanáší do protokolu o zkoušce.

Charakter indikací ve svarech je posuzován dle normy ČSN EN ISO 23279. Na základě požadovaného stupně kvality svaru je zvolena třída zkoušení danou ultrazvukovou technikou a vůči ní se posuzuje přípustnost. Tyto závislosti uvádí norma ČSN EN ISO 17635 a jejich shrnutí je uvedeno v tabulce 1.

Tab. 1 Volba norem pro zkoušení a hodnocení svarů UT technikami. [26]

Název techniky	Třídy zkoušení dle	Stupně přípustnosti dle
Odrazová	ČSN EN ISO 17640	ČSN EN ISO 11666
TOFD	ČSN EN ISO 10863	ČSN EN ISO 15626
Phased Array	ČSN EN ISO 13588	ČSN EN ISO 19285

UT svarů austenitických ocelí a niklu je náročnější z důvodu hůře prostupné struktury. Nejlépe se tyto svary testují technikou Phased Array a jejich zkoušení se řídí normou ČSN EN ISO 22825.

Ultrazvukového zkoušení se využívá pro odhalování vnitřních vad svarů. Pomocí moderních technik lze kontrolovat celý objem svarů tlouštěk od jednotek mm do stovek mm. Mezi nevýhody zkoušení patří nutnost použití referenčních měrek, nezjistitelnost vad v mrtvé zóně pod povrchem, nezbytnost aplikace pomocného média (gelu) na povrch a náročnost posuzování zobrazovaných indikací. Aby byly výsledky UT zkoušky relevantní, musí ji provádět kvalifikovaný a zkušený operátor, protože rozpoznání druhů vad není snadné.

1.2.5 Prozařovací metody [1], [7], [26], [29]

U tohoto typu testovacích metod je využito vysokofrekvenčních záření, která prochází svary a zachycují se na detekčních zařízeních. Díky různé intenzitě zeslabení záření při jejich průchodu materiály jsou na stínítkách následně promítnuty vady vyskytující se uvnitř. Nejčastěji se pro zkoušení aplikuje brzdné rentgenové záření (RTG záření), protože oproti gama či neutronovému záření má několik výhod. Jeho spojité spektrum zaručuje lepší kontrast obrazu, může být nastavena libovolná intenzita záření a jeho působení lze kdykoliv přerušit vypnutím rentgenky. Oproti tvrdším zářením (gama, neutronové) je při průchodu materiálem rychleji zeslabováno.

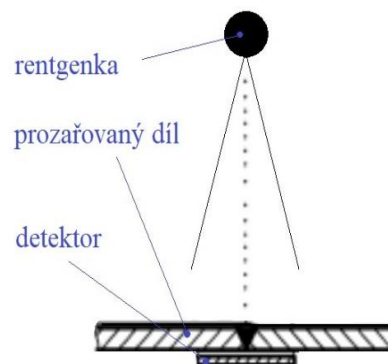
Záření vzniká primární a rozptýlené. Vady jsou detekovány díky primárnímu, které materiálem prochází přímočaře. Rozptýlené je naopak rušivé, a proto je potlačováno. Útlum záření při průchodu materiálem závisí na tloušťce a typu materiálu dle zákona zeslabení, jenž je vyjádřený rovnicí 1.3:

$$I_t = I_0 \cdot e^{-\mu t} \quad (1.3)$$

kde: I_t – intenzita prošlého záření zeslabeného tloušťkou t [$W \cdot m^{-2}$]
 I_0 – počáteční intenzita záření [$W \cdot m^{-2}$]
 e – Eulerovo číslo [-]
 μ – zeslabovací součinitel [m^{-1}]
 t – tloušťka materiálu [mm]

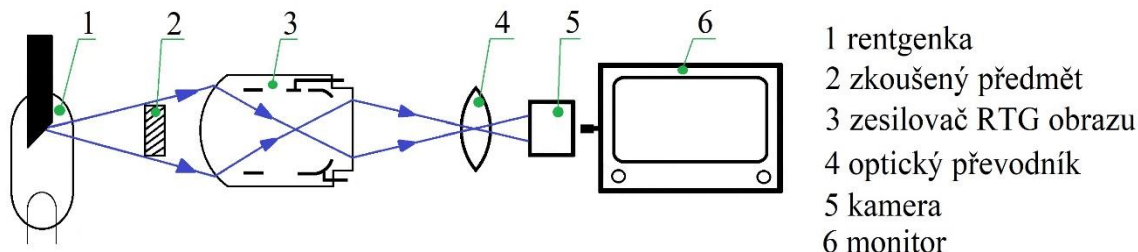
RTG prozařování může být provedeno různými technikami, které se dělí na radioskopické a radiografické. Radiografické používají jako detektory fotografické filmy, případně paměťové fólie. Metody radioskopické umožňují okamžité zobrazení prozářeného obrazu na monitoru. V technické praxi se aplikují:

- Filmová radiografie (RT-F) – při níž je záření zaznamenáno na film (obr. 18). Film musí být chemicky vyvolán. Výsledkem zkoušky je radiogram.
- Foliová digitální radiografie (RT-CR) – jež využívá k detekci záření paměťové fólie převádějící jej do digitální podoby. Díky ní dochází ke zrychlení vyhodnocování obrazu a naskýtá se možnost automatizace detekce indikovaných vad. Schéma zkoušky je zakresleno na obr.18. Jedná se o obdobné sestavení jako u RT-F (pouze detektor je jiný).



Obr. 18 Princip radiografických technik [29]

- Radioskopické techniky (RT-S) – používají stínítko, z něž je dopadající RTG záření převáděno ihned na elektronický signál, který prochází okamžitou transformací na digitální obraz, viz obr. 19. Tohoto se využívá při pásové kontrole výrobků, kdy prozářené obrazy vnitřní struktury svarů mohou být vyhodnocovány automaticky pomocí softwarů.

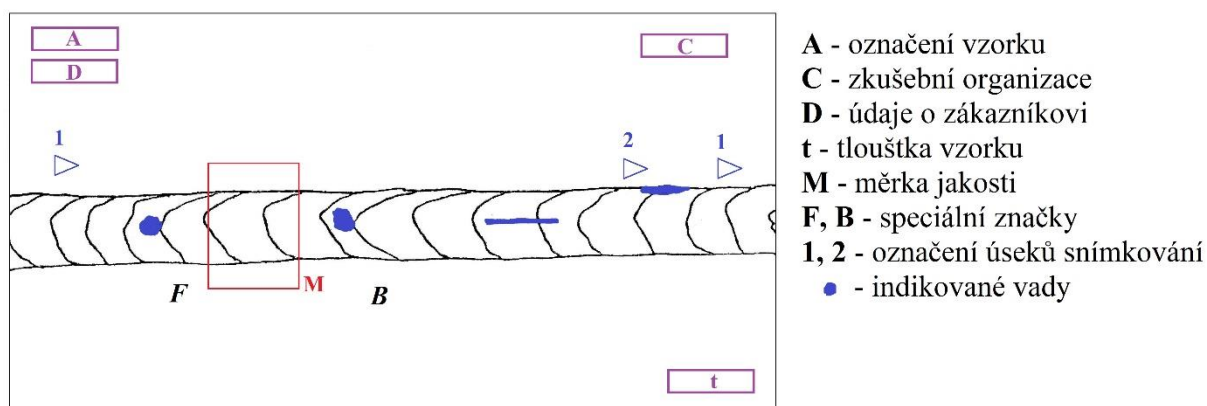


Obr. 19 Radioskopické zkoušení [7]

Základní pravidla radiografického zkoušení kovových materiálů udává norma ČSN EN ISO 5579. Radioskopické zkoušení upravuje norma ČSN EN ISO 13068-3. Radiografické zkoušení svarových spojů je specifikováno normou ČSN EN ISO 17636-1 pro RT-F, resp. ČSN EN ISO 17636-2 pro RT-CR. Dle zmíněných norem jsou radiografické techniky členěny do dvou tříd – A, B. Třída A je použita primárně, k aplikaci třídy B se přistupuje v případě nedostatečné citlivosti A.

Před začátkem prozařování musí být očištěn povrch vzorku od hrubých nečistot. Dále jsou zvoleny potřebné parametry zkoušky – technika snímkování, intenzita záření, ostrost. Zkoušený úsek svaru je osazen potřebnými identifikačními značkami (označením svaru, číslem snímku, hranicemi zkoušené oblasti, směrem zkoušení, indikátorem rozptýleného záření B, označením výrobce, zkušebny aj.). Vždy musí být přiložena vhodná měrka jakosti obrazu, běžně bývá na straně vzorku bližší zdroji záření. Pokud je přiložena na straně u detektoru, doplňuje se k ní písmeno F. Snímkováním vznikají radiogramy (možné rozložení identifikátorů na radiogramu je znázorněno na obr. 20), všechny v nich indikované vady jsou vyhodnoceny kvalifikovaným pracovníkem na prosvětlovacích zařízeních (negatoskopech) a následně zaneseny do protokolu o zkoušce.

Stupně přípustnosti vad u radiografických zkoušek se řídí normami ČSN EN ISO 10675-1 pro ocel, nikl, titan a jeho slitiny a ČSN EN ISO 10675-2 pro hliník a jeho slitiny. Norma ČSN EN ISO 17635 udává souvislost mezi požadovanými stupni kvality svarů, třídami zkoušení a stupni přípustnosti u daných technik. Závislosti jsou uvedeny v tabulce 2.



Obr. 20 Značení radiogramu [7]

Tab. 2 Volba norem pro zkoušení a hodnocení svarů RT technikami. [26]

Technika	Třídy zkoušení dle	Stupně přípustnosti dle
RT-F	ČSN EN ISO 17636-1	ČSN EN ISO 10675-1 a 2
RT-CR	ČSN EN ISO 17636-2	ČSN EN ISO 10675-1 a 2
RT-S	ČSN EN ISO 13068-3	nejsou definovány normami

Pomocí RT metod lze spolehlivě detekovat objemové vady – vměstky, póry – ve svarech o menších tloušťkách (jednotky mm – desítky mm). Plošné vady typu trhlin či studených spojů jsou obtížněji detekovatelné. Pro jejich úspěšné rozpoznání je potřeba, aby vady byly orientovány příznivě vůči směru prozařování. Signifikantními nevýhodami prozařovací zkoušky jsou přítomnost nebezpečného pronikavého záření, před kterým je třeba se chránit, a nákladné provedení zkoušky.

1.2.6 Shrnutí metod zkoušení [7], [16]

V předchozích kapitolách byla popsána problematika pěti základních metod defektoskopického zkoušení. V tabulce 3 jsou sepsána tvrzení o jednotlivých typech. Platnost a neplatnost tvrzení je značena symbolem ✓, respektive symbolem X. U dvou tvrzení je zapsána kombinace ✓X. V prvním případě podtrhuje skutečnost, že při zkoušení ultrazvukovou metodou nemohou být detekovány mělké povrchové vady kvůli přítomnosti mrtvé zóny sondy, ovšem povrchové diskontinuity o větší hloubce již detekovatelné jsou. V druhém případě upozorňuje kombinace ✓X na omezené možnosti prozařovacích metod zkoušení při detekci plošných vad. Zřetelné indikace vad se na detektorech objeví, pouze pokud jsou diskontinuity vhodně orientovány k směru procházejícího záření. Některé metody mají oproti ostatním významné nevýhody:

- magnetická prášková – použitelnost pouze na feromagnetické svary,
- ultrazvuková – nutnost použití kalibračních měrek a kontaktních prostředků (gelů),
- rentgenová – nákladnost, nebezpečné záření.

Tab. 3 Shrnutí NDT metod.

Zkoušení danou metodou		VT	PT	MT	UT	RT
detekuje	povrchové vady	✓	✓	✓	✓X	X
	podpovrchové vady	X	X	✓	✓	✓
	vnitřní objemové vady	X	X	X	✓	✓
	vnitřní plošné vady	X	X	X	✓	✓X
vyžaduje	kvalifikovanou obsluhu	✓	✓	✓	✓	✓
	oboustranný přístup ke svaru	✓	✓	✓	X	✓
umožňuje	automatizaci	X	X	✓	✓	✓
	určit hloubku vady	X	X	X	✓	✓
může způsobit vznik falešných indikací		X	✓	✓	✓	✓
je rychlé		✓	✓	✓	X	X

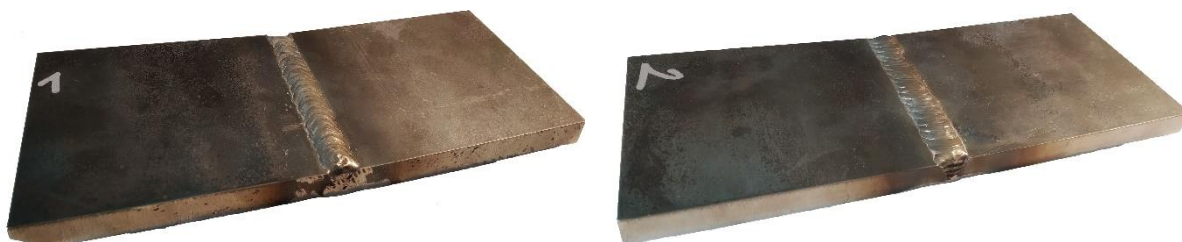
1.3 Kvalifikace pracovníků NDT [7], [30], [31]

Pracovník provádějící NDT svarů a jejich následné vyhodnocování musí mít potřebnou kvalifikaci na zkoušení danou metodou dle normy ČSN EN ISO 9712. Norma udává tři kvalifikační stupně. Technik s kvalifikací 1. stupně může konat defektoskopické úkony pouze pod dohledem osoby s vyšším stupněm kvalifikace, nesmí zkušební metodu vybírat a hodnotit výsledky testování. S kvalifikací 2. stupně může technik rozhodovat o volbě defektoskopických technik dle předepsaných pravidel, vyhodnocovat výsledky testování a činit dozor při nedestruktivním zkoušení. S nejvyšší kvalifikací 3. stupně pracovník rozhoduje o konkrétním použití NDT metod, jejich technik a postupů, ovšem vždy pouze v té oblasti zkoušení, v níž je vyškolen.

2 EXPERIMENT

Pro praktickou zkoušku nedestruktivního testování byly připraveny dva vzorky (obr. 21), každý svařen s jinými parametry tak, aby se docílilo výskytu vad, které by bylo možné odhalit následným defektoskopickým testováním. Svaření vzorků proběhlo ve firmě ECOS Choceň s.r.o., následné NDT zkoušení bylo provedeno ve firmě TESIYO, s.r.o.

Z důvodu ověření postupů hodnocení vad a jejich indikací byl u obou spojů zvolen stupeň kvality svaru D dle ČSN EN ISO 5817 s vědomím, že svary byly vyhotoveny nesprávně a detekované vady mohou být vůči stupni D nepřijatelné.



Obr. 21 Svařené vzorky

2.1 Specifikace svařovaných plechů [32], [33], [34]

Pro tvorbu vzorků byly vybrány plechy o rozměrech 12x125x100 mm z nelegované jakostní oceli S235JR. Jedná se o dobře svařitelnou uklidněnou ocel používanou pro méně namáhané svařované konstrukce. Chemické složení a mechanické vlastnosti použité oceli jsou znázorněny v tab. 4, resp. v tab. 5.

Tab. 4 Chemické složení oceli S235JR. [32]

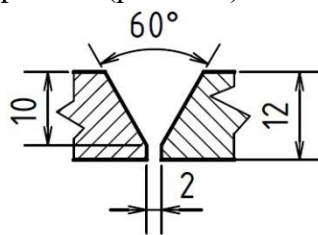
maximální obsah prvků v %						
C	Mn	P	S	N	Cu	Si
0,19–0,23	1,5	0,045	0,045	0,014	0,6	0

Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli S235JR. [32]

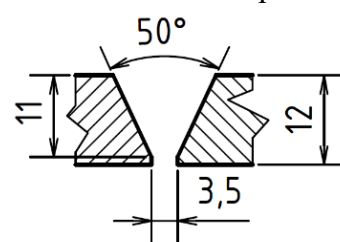
min. Re [MPa]	Rm [MPa]	KV [J]	A [%]
165–235	330–510	27	21–26

Geometrie svarových ploch obou vzorků je stejná (obr. 22). Plechy byly spojeny tupými V svary v celé šířce (100 mm) pomocí svářečky FRONIUS FK 4000-R. Svařování bylo provedeno v poloze PA metodou MAG s přidávným materiálem ve formě plného drátu, který byl do svarové lázně přenášen zkratovým způsobem.

S přihlédnutím k podnikovému svařovacímu postupu WPS č. BW-20-1-135-070, specifikujícímu tupé spoje plechů tlouštěk 7–24 mm, byly pro oba vzorky vytvořeny předběžné svařovací postupy pWPS1 (příloha 1) a pWPS2 (příloha 2). V nich došlo k vhodnému upravení parametrů procesu a geometrie svarových ploch, aby bylo docíleno výskytu vad ve strukturách spojů. Geometrie předepsaná podnikovým svař. postupem je pro porovnání s upravenou geometrií znázorněna na obr. 23. Vybraná kritéria svařování obou spojů dle pWPS jsou vypsaná v tabulce 6 spolu s parametry vyjmutými z podnikové WPS.



Obr. 22 Geometrie svarových ploch dle vytvořených pWPS



Obr. 23 Geometrie svarových ploch dle podnikové WPS

Specifikace přídavného materiálu dle katalogu firmy ESAB je v příloze 3.

Svarový spoj vzorku 1 (obr. 21 vlevo) tvoří kořenová, výplňová a krycí housenka. Pro kořenovou vrstvu svaru byl zvolen nižší proud oproti předepsané hodnotě ve WPS, aby došlo k neúplnému průvaru kořene. K podpoření šance na vznik studeného spoje mezi svarovým kovem a základním materiálem byl nastaven proud na spodní hranici intervalu dle WPS a také byla při svařování výplňové housenky výrazně sklopená hubice pro podporu nerovnoměrného natavení svarových ploch. Kladené housenky nebyly v průběhu svařovacího procesu čištěny, lze očekávat výskyt vměstků.

Spoj vzorku 2 (obr. 21 vpravo) je tvořen čtyřmi housenkami. Oproti předchozímu svaru byla přidána jedna výplňová housenka navíc, aby byl prostor svarové mezery lépe vyplněn. Hodnoty svařovacích proudů byly nastaveny v intervalech daných WPS, ale došlo k omezení přívodu ochranného plynu. Svarový kov by neměl být kvůli nedostatku ochranného plynu dostatečně chráněn před okolní atmosférou, a proto by měly ve spoji vznikat póry.

Pro každou svarovou housenku spojů byl na základě parametrů předepsaných v pWPS spočítán tepelný příkon značící množství energie, jež bylo dodáno do svarového místa, konkrétně do 1 mm délky housenky. Výpočet proběhl dle vzorce 1.4 daného normou ČSN EN 1011-1:

$$Q = \eta \cdot \frac{U \cdot I}{v_s \cdot 1000} \quad (1.4)$$

kde: Q – tepelný příkon [kJ·mm⁻¹]
 η – tepelná účinnost metody svařování [-] (pro MAG η = 0,8)
 U – svařovací napětí [V]
 I – svařovací proud [A]
 v_s – rychlost svařování [mm·s⁻¹]

Tab. 6 Svařovací parametry vzorků.

parametr	WPS	svar 1	svar 2
přídavný materiál	ESAB Weld G3Si1		
ochranný plyn	M23 (91 % Ar + 5 % CO ₂ + 4 % O ₂)		
průtok ochranné atmosféry [l·min ⁻¹]	16	16	4
svar. proud kořenové housenky [A]	105-120	90	110
svar. proud výplňové housenky [A]	110-125	110	125
svar. proud krycí housenky [A]	115-130	130	130

2.2 Metody zkoušení [26]

Výběr vhodných metod NDT podléhá normě ČSN EN ISO 17635, podle níž jsou pro hodnocení vad v tupých spojkách z oceli S235JR, tloušťek 12 mm voleny:

- VT + PT, příp. VT + MT pro povrchové nečistosti,
- RT nebo UT pro vnitřní vady.

Pro oba vzorky bylo zvoleno ozkoušení defektoskopickými metodami VT, PT, MT a RT. Veškeré zkoušení svarů proběhlo v laboratořích firmy TESIYO, s.r.o, za pomoci technika majícího kvalifikaci stupně 2 dle ČSN EN ISO 9712.

Svarové spoje byly hodnoceny vůči zvolenému stupni kvality zhotovení svaru D dle ČSN EN ISO 5817, na jehož základě se určily stupně přípustnosti indikací vad při následném zkoušení (kromě VT, u níž se vady posuzovaly přímo zmíněnou normou).

2.2.1 Vizualní zkouška [11], [12], [35]

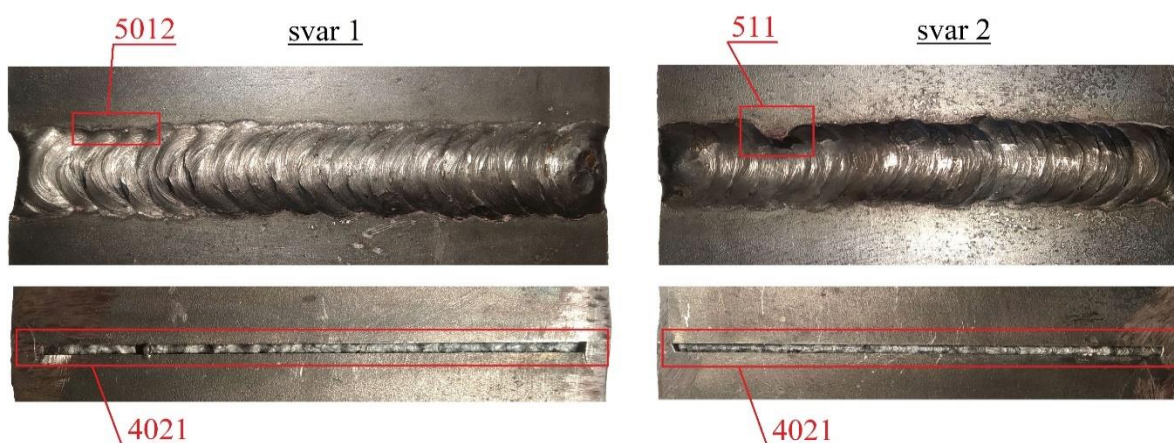
Průběh zkoušky reflektoval požadavky normy ČSN EN ISO 17637. Svarové spoje a jejich blízké okolí byly před zahájením kontroly řádně očištěny od nečistot a rozstříku. Hodnota osvětlení povrchu 416 lx vyhovovala požadavkům přímé vizualní kontroly. K hodnocení

rozměrů nalezených vad a jejich lokaci byly použity svarová měrka CAM TYPE GAUGE a ocelové pravítko.

Zjištěny byly následující vady spojů (označení a referenční čísla dle ČSN EN ISO 6520-1):

- svar 1:
 - lícová strana: nesouvislý zápal (5012),
 - kořenová strana: neprovařený kořen (4021) v celé délce;
- svar 2:
 - lícová strana: neúplné vyplnění svaru (511),
 - kořenová strana: neprovařený kořen (4021) v celé délce.

Nalezené vady svarových spojů jsou zvýrazněny na obr. 24 a jejich přípustnost se stupněm jakosti D dle ČSN EN ISO 5817 je zhodnocena v tab. 7.



Obr. 24 Nalezené vady VT

Tab. 7 Přípustnost vad při VT.

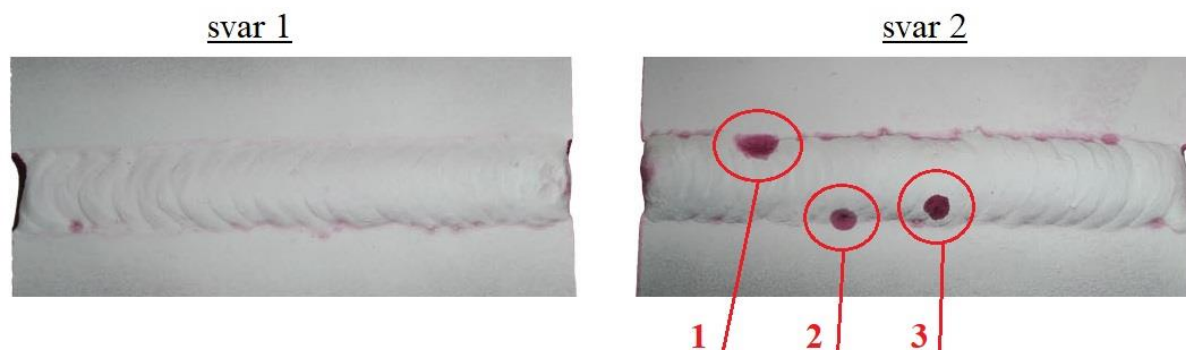
svar	vada	velikost	mezni velikost	pripustnost vady
1	5012	h = 0,5 mm	h = 1 mm	pripustna
1	4021	l = 100 mm	pouze kratke vady	nepripustna
2	511	h = 0,5 mm	h = 2 mm	pripustna
2	4021	l = 100 mm	pouze kratke vady	nepripustna

Vizuálním zkoušením byla zjištěna u obou svarových spojů neshoda s požadovaným stupněm kvality D. Lícové strany spojů vyhovují, ale kořenové by musely být přebroušeny a znovu svařeny, aby vyhovovaly podmínkám požadovaného stupně.

2.2.2 Kapilární zkouška [15], [17]

Testování se řídilo normou ČSN EN ISO 3452-1. Pro zkoušku byla zvolena sestava zkušebních prostředků IICe od výrobce Pfinder – barevný kontrastní penetrant (II), rozpouštědlem odstranitelný prostředek k odstranění penetrantu (C) a vývojka na bázi rozpouštědla (e). Vzorky byly očištěny, odmaštěny. Na jejich povrchu byla změřena teplota (23 °C) a intenzita osvětlení (1032 lx). Byl nanesen penetrant a ponechán působit 10 minut. Poté došlo k očištění povrchů a aplikaci vývojky, se zvoleným časem vyvíjení 15 minut.

Hodnocení podléhaly kompletní plochy povrchů svarů a oblasti 10 mm na každou stranu od svarových housenek. Jakostnímu stupni D je přiřazen stupeň přípustnosti 3 definovaný ČSN EN ISO 23277. Indikace vad byly prohlédnuty ihned po zaschnutí vývojky a následně po uplynutí vyvíjecího času. Indikace zobrazené po zaschnutí vývojky se už výrazněji nezvětšily. Stav lícových stran svarů po uplynutí vyvíjecího času je zobrazen na obr. 25



Obr. 25 Vady indikované PT

spolu s označením indikací. V tab. 8 jsou porovnány změřené rozměry indikací s maximálními přípustnými velikostmi udávanými stupněm přípustnosti 3.

Tab. 8 Přípustnost indikací vad při PT.

svar	indikace	typ indikace	změřený rozměr [mm]	maximální přípustný rozměr [mm]	přípustnost indikace
1	bez indikací				
2	1	nelineární	d = 7,2	d = 8,0	přípustná
2	2	nelineární	d = 4,3		
2	3	nelineární	d = 5,8		

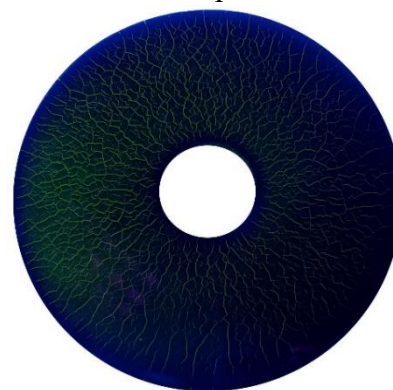
Na povrchu spoje 1 byly detekovány pouze drobné falešné indikace způsobené nedostatečným očištěním po hranici svarové housenky. Lícová strana svaru vyhovuje stupni kvality D, stejně jako lícová strana svaru 2. Neprůvary kořenů u obou spojů by zapříčinily rozměrné lineární indikace, které by nebyly přípustné, proto jsou oba svary hodnoceny jako nevyhovující stupni kvality D.

2.2.3 Magnetická zkouška [19], [21]

Zkoušení proběhlo dle normy ČSN EN ISO 17638 fluorescenční metodou. Plocha zkoušeného povrchu byla stejná jako u kapilární zkoušky, tedy povrch svarové housenky a 10 mm pás na každou stranu od ní. Na očištěném povrchu byla naměřena teplota 23 °C, intenzita osvětlení 4 lx. a intenzita záření vysílaného dílenskou UV lampou 13,5 W·m⁻².

Magnetizace vzorků proběhla pomocí jha HUATEC HCDX s roztečí pólů 90 mm a procházejícím magnetizačním AC proudem rovným 1,4 A. Magnetizace jha byla ověřena na etalonu o dané hmotnosti. Citlivost detekční fluorescenční suspenze MPS-F byla ozkoušena měrkou MTU-3 (obr. 26), správný směr magnetování byl testován měrkou Bertholdovou přiloženou k povrchu.

Plochy byly ozkoušeny ve vzájemně kolmých směrech po celé délce svarů tak, aby byla zaručena detekce různě orientovaných vad. Zmagnetizované lícové strany vzorků s nanesenou suspenzí jsou zobrazeny na obr. 27. Lze vidět, že nedošlo k detekci žádných indikací vad, viditelné jsou pouze povrchové vrypy vzniklé čištěním. Pokud by došlo k výskytu



Obr. 26 Měrka MTU-3

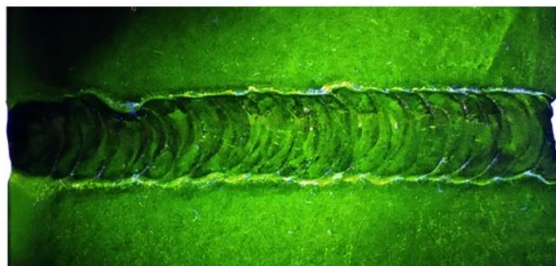
indikací, byly by hodnoceny dle normy ČSN EN ISO 23278 ve 3. stupni přípustnosti pro předepsaný stupeň kvality svaru D. Kořenové strany svarů nebyly zkoušeny, ale je očividné, že by indikace neprovařených kořenů obou vzorků byly rozsáhlé a nepřípustné. Svary jsou proto shledány jako nevyhovující k požadovanému kvalitativnímu stupni.

Po zhodnocení povrchů byly vzorky pouze očištěny od suspenze bez nutnosti následné demagnetizace vzhledem k použití AC magnetizačního proudu.

svar 1



svar 2



Obr. 27 Líčové strany vzorků při MT

2.2.4 Zkoušení prozařováním [7], [29], [36]

Pro zkoušení byl zvolen způsob prozařování RTG zářením, konkrétně technika radiografická filmová RT-F specifikovaná normou ČSN EN ISO 17636-1.

Uspořádání zkoušky je znázorněno schematicky na obr. 18. Pro každý vzorek byl použit film KODAK INDUSTREX T200 (10 x 12 cm), olověná fólie tloušťky 0,027 mm a zdroj záření GE Seifert ERESKO 42 MF4.

Na základě požadovaného jakostního stupně svarů D byla určena technika zkoušení třídy A. Dle materiálu (ocel), způsobu prozařování (přes jednu stěnu), třídy jakosti obrazu (B) a tloušťky prozařovaného materiálu (8–12 mm) byly vybrány jakostní drátkové měrky IQI 10 Fe EN s požadovanou minimální rozeznatelností W14. Následně byla ke každému vzorku přiložena měrka IQI spolu s číselným označením vzorků, viz obr. 28.

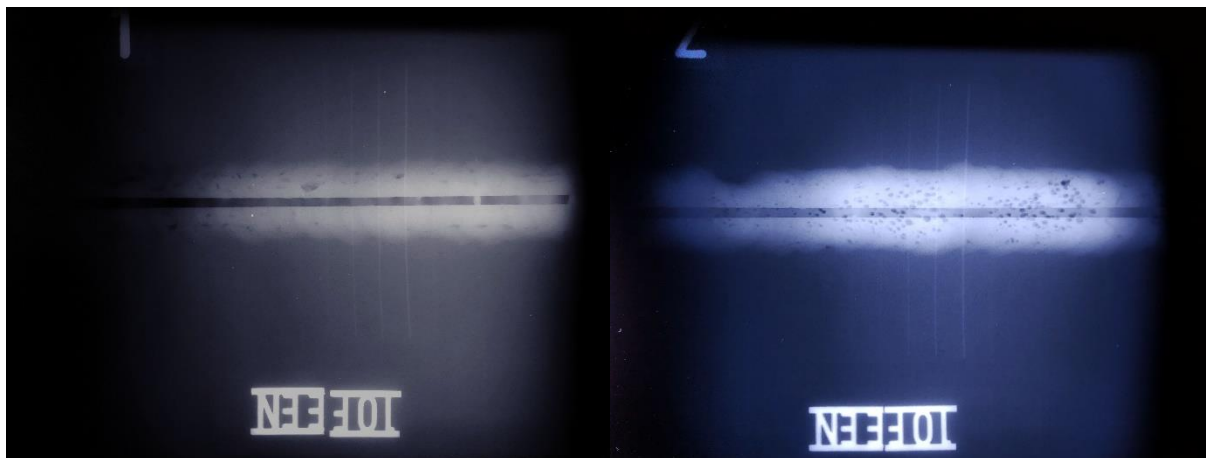
Prozařování vzorků proběhlo uvnitř izolované komory, aby byla zaručena ochrana personálu. Expozice trvala 80 s, napětí na rentgence bylo nastaveno na 160 kV, proud na hodnotu 5,6 mA. Radiogramy byly vyvolány ručně.

Ke korektnímu hodnocení indikací vad z radiogramů bylo použito stupně přípustnosti 3 dle ČSN EN ISO 10675-1, který odpovídá požadovanému stupni jakosti svaru.



Obr. 28 Označení vzorku 1 před zahájením prozařování

Radiogramy byly prosvětleny negatoskopem a vyfotografovány, viz obr. 29. Snímky jsou bez fotografických vad, s minimální rozeznatelností W14 (průměr drátku 0,16 mm) a vyhovujícím zčernáním.

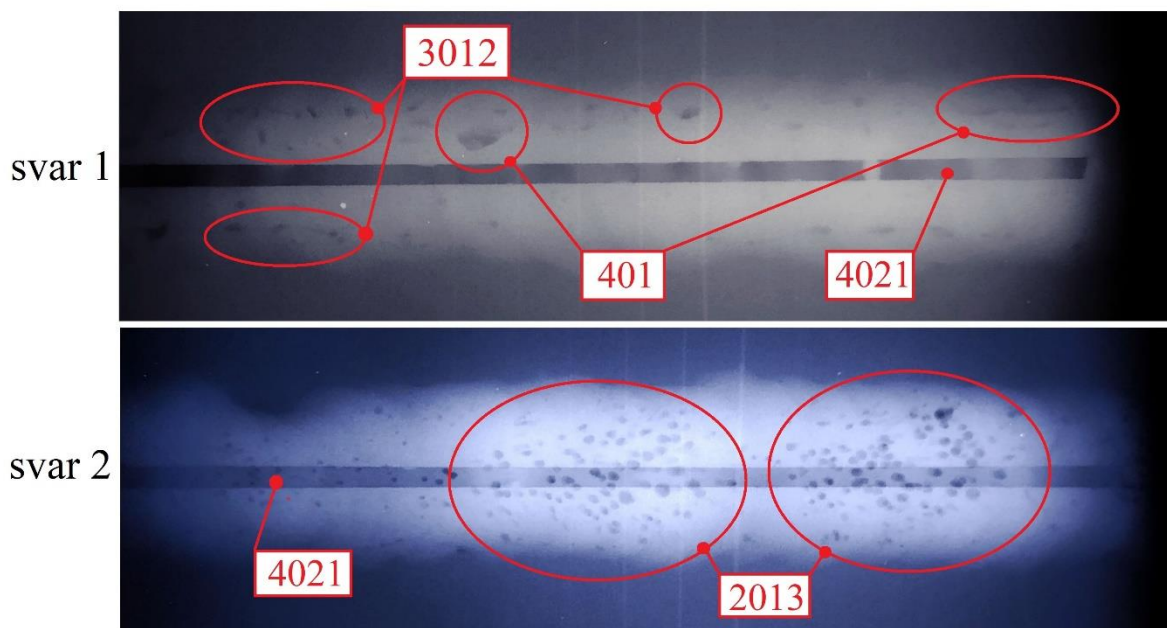


Obr. 29 Radiogramy svarů

Podrobněji jsou oblasti svarů zobrazeny na obr. 30. Prozářením byly detekovány a rozpoznány vady (dle ČSN EN ISO 6520-1):

- svar 1:
 - ojedinělý struskový vměstek (3012),
 - studený spoj (401),
 - neprovařený kořen (4021);
- svar 2:
 - shluk pórů (2013),
 - neprovařený kořen (4021).

Jejich přípustnost je posouzena podle normy v tab. 9.



Obr. 30 Detailní radiogramy svarů

Tab. 9 Přípustnost indikací vad při RT.

svar	vada	argument	přípustnost indikace
1	3012	součet délek vměstků je větší než tloušťka svaru	nepřípustná
1	401	vady přerušované o celkové délce max. 25 mm	přípustná
1	4021	neprůvar je po celé délce svaru	nepřípustná
2	4021	neprůvar je po celé délce svaru	nepřípustná
2	2013	průměr obal. křivek shluků pórů je menší než 25 mm	přípustná

Svary byly označeny jako nevyhovující ve stupni kvality D, protože u obou byly nalezeny indikace vad nepřipustné ve stupni 3.

2.3 Výbrusy vzorků [11]

V poslední části experimentu byly vytvořeny metalografické výbrusy svarů pro porovnání a verifikaci skutečného stavu vad s jejich indikacemi zobrazenými na radiogramech. U každého vzorku byla na základě snímků z rentgenové zkoušky zvolena přibližná poloha řezu tak, aby řez procházel vadami.

Nejprve byly z obou vzorků plazmovým paprskem odděleny výřezy svarů (obr. 31), pro jejichž dělení byla použita emulzí chlazená metalografická pila (obr. 32). Vybrané plochy vzorků byly postupně vyhlazovány brusnými papíry P180, P400, P600 a P1200. Následovalo několikaminutové leptání v roztoku 10% Nitalu (HNO_3 + líh) (obr. 33).

Vady jsou na výbrusech svarů (obr. 34) díky vyleštění a naleptání rozpoznatelné pouhým okem. Pro přesnější hodnocení byly vzorky prohlédnuty optickým mikroskopem při zvětšení obrazu 50x, viz obr. 35–39.



Obr. 31 Plazmové řezání

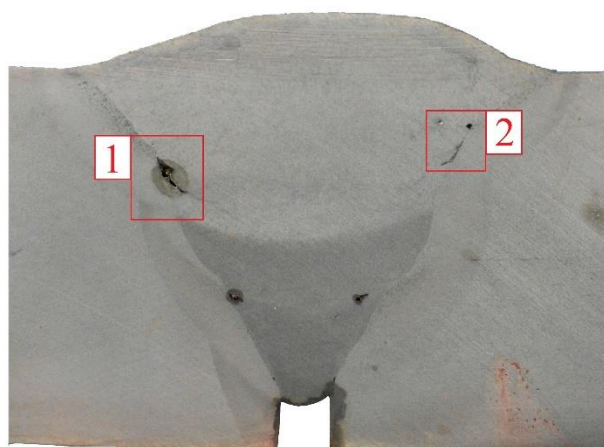


Obr. 32 Dělení kotoučem

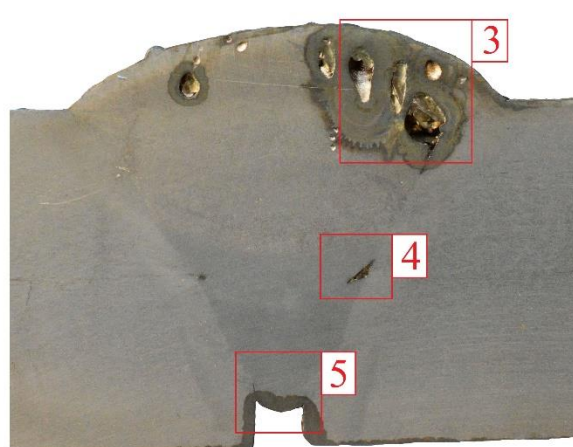


Obr. 33 Leptání

svar 1



svar 2

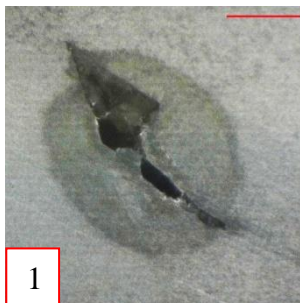


Obr. 34 Vybroušené a naleptané vzorky

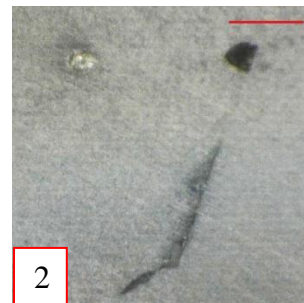
Na zvětšených snímcích se nachází úsečka červené barvy, značící velikost 1 mm, pro představu o skutečné velikosti vad. Je zřetelně vidět, že odhalené vady korespondují s jejich indikacemi detekovanými prozařovací zkouškou.

U svaru 1 byly vybrány dvě oblasti k podrobnějšímu zobrazení. Detail 1 (obr. 35) zachycuje struskový vměstek (301) nacházející se spolu s dutinami (200) na hranici dvou svarových vrstev. Na dutiny navazuje mezihousenkový studený spoj (4012). Na druhém detailu (obr. 36) je vidět studený spoj, v tomto případě se vyskytující na svarové ploše (4011), a další struskový vměstek.

Výbrus druhého vzorku odhaluje větší spektrum vad. Detail 3 (obr. 37) z horní části svaru 2 přibližuje shluk pórů (2013). Na obr. 38 je na rozhraní svarových housenek zachycen rozměrný struskový vměstek. V posledním detailu (obr. 39) lze vidět studený spoj v kořeni svaru (4013).



Obr. 35 Detail 1



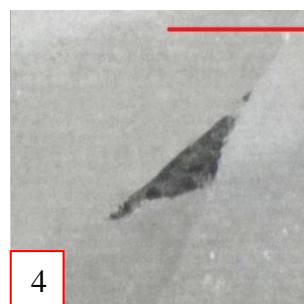
Obr. 36 Detail 2

Destruktivní otestování vzorků definitivně potvrdilo hypotézy, které byly položeny na počátku experimentu.

U prvního svaru vznikly na svarových plochách kvůli nízkému svařovacímu proudu lokální studené spoje. Vada 4011 je kromě zmíněných detailních snímků patrná i v levé části kořenové housenky, kde očividně nedošlo k závaru. Důsledek odklonu hubice hořáku od jedné svarové plochy a vyšší rychlosti svařování při tvorbě výplňové housenky lze vidět na detailech 1 a 2. Při svařování byla výrazněji natavována pravá hrana svaru, na níž přesto nedošlo k plnému závaru. Ani na levé hraně neproběhlo úplné spojení svarového kovu se základním materiálem. Jelikož mezi kladením jednotlivých housenek nebyla čištěna struska, ve svarovém kovu zůstala ve formě vměstků. Mezi svarovými housenkami se objevily vady 4012 kvůli kombinaci volby nedostatečného proudu a vyskytujících se nečistot.

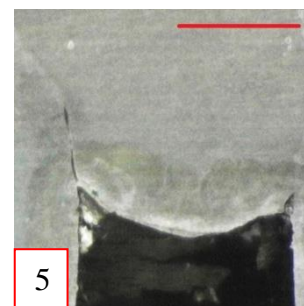


Obr. 37 Detail 3



Obr. 38 Detail 4

Druhý spoj byl vědomě svařován s nižším průtokem ochranné atmosféry, což se mělo projevit vysokou pórovitostí svaru. Hypotéza byla ověřena již prozařovací zkouškou, poznatky z metalografického výbrusu následně ukázaly, jaké je skutečné rozložení pórovitosti v průřezu svaru. Dutiny s plyny uzavřené v nižších vrstvách spoje byly následným kladením vrstev roztaveny a plyny se přesunuly do vyšších míst. Krycí vrstva svaru nebyla dále tavena, část plynů tedy zůstala uzavřena ve svarovém kovu a vytvořila póry. Svařovací proudy byly pro jednotlivé vrstvy sice zvoleny podle podnikové WPS, ale vzhledem k použití odlišné geometrie svarových ploch nedošlo k provaření kořene a v místě vznikl studený spoj, viz obr. 39.



Obr. 39 Detail 5

3 ZÁVĚRY

V práci byla provedena rešerše týkající se problematiky nedestruktivního zkoušení svarů. Rozebrány byly základní metody testování – vizuální, magnetická prášková, penetrační, ultrazvuková a prozařovací – jejich princip, postup zkoušení a vyhodnocování s důrazem na normy, dle kterých se testování a hodnocení provádí. Jednotlivé metody byly vzájemně porovnány.

V experimentální části práce byly zhotoveny metodou svařování MAG dva vzorky svarů z oceli S235JR se záměrně upravenými svařovacími parametry tak, aby se zvýšila šance na výskyt vad. Spoje byly zhotoveny dle vytvořených pWPS (příloha 1, 2). Vzorky byly otestovány metodou kapilární, magnetickou práškovou, vizuální a rentgenovou. Kvalita svarů při zkoušení těmito metodami byla z důvodu ověření systému hodnocení vad a jejich indikací porovnávána se stupněm jakosti D dle ČSN EN 5817. Lícové strany svarů byly u metod VT, PT a MT hodnoceny jako vyhovující stupni jakosti D, ovšem kořenové strany nevyhovovaly požadované kvalitě kvůli neprovařeným kořenům, proto byly svary hodnoceny jako celkově nevyhovující požadovanému stupni kvality svaru. Radiogramy z prozařovací zkoušky potvrdily výskyt vnitřních vad dle počátečních předpokladů.

Poslední část experimentu se zabývala vyhotovením metalografických výbrusů. Výbrusy odhalily studené spoje na svarových plochách, v kořeni svaru i v mezihousenkové oblasti vzniklé v důsledku volby nízkých svařovacích proudů pro některé housenky. Přítomnost struskovitých vměstků byla zapříčiněna neodstraněním strusky mezi pokládáním jednotlivých housenek a také nízkými parametry, které vedly k neroztavení vměstků. Vysoká pórovitost u jednoho ze vzorků vznikla v důsledku nízkého průtoku ochranné atmosféry.

Provedením experimentu byly potvrzeny informace získané rešerší, z nichž několik stojí za zdůraznění. Ze získaných radiogramů je zřejmé, že prozařovací metoda není vhodná na detekci vad plošných, pokud nejsou orientovány příznivě ke směru průchodu záření. Porovnáním snímků PT a MT svaru 2 (obr. 25 a 27) lze hodnotit testování magnetickou práškovou metodou jako nevhodné pro detekování nelineárních indikací vad. Provedenými zkouškami bylo prokázáno, že žádnou metodou nelze stoprocentně zhodnotit celkový stav svaru. Vždy je nutné použít vhodnou kombinaci metod v závislosti na tloušťce svarů, materiálu, případně na vadách, jež mají být odhaleny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [37]

1. KOPEC, Bernard. *Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV)*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008. ISBN 978-80-7204-591-4.
2. GRILL, Jeff. Weld Quality Testing. *Weld Guru* [online]. WeldGuru.com, c2006–2021, 2. 2. 2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://weldguru.com/weld-quality-testing/>
3. How Liquid Penetrant Inspection (PT) Works. *Penflex* [online]. Gilbertsville (Pensylvania): Penflex Corporate [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.penflex.com/how-liquid-penetrant-inspection-pt-works/>
4. Magnetic Particle (Magnaflux). *Sub Source Inc* [online]. Rockford: Sub Source, Inc. [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.subsourceinc.com/magnetic-particle/>
5. Services. *Fortis Weld Inspection* [online]. Auckland: Fortis Weld Inspection, c2019 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://fortisweldinspection.co.nz/services>
6. CRT Butt weld testing of pressure vessels and pipes. *LMATS* [online]. LMATS Pty. Ltd., c2009–2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://lmats.com.au/services/advanced-ndt-solutions/crt-computed-radiographic-testing/crt-butt-weld-testing-of-pressure-vessels-and-pipes>
7. MÍŠEK, Bohumil. *Metody nedestruktivního zkoušení kovových materiálů a výrobků*. Brno: TESYDO, 2014. ISBN 978-80-87102-09-1.
8. KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER, Pavel MAZAL a kolektiv. *Výrobní technologie a typické vady výrobků (Basic): studijní příručka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2020. ISBN 978-80-214-5878-9.
9. MUSIL, Miloslav a Jaromír MORAVEC. *Výroba a aplikované inženýrství ve svařování: výukové materiály pro kurzy Mezinárodní svářečský inženýr IWE, Mezinárodní svářečský technolog IWT*. Česká Třebová: DOM-ZO 13, 2017. ISBN 978-80-906720-0-0.
10. MAJER, Lubomír. *Navrhování a posuzování svařovaných konstrukcí a tlakových zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 1999. ISBN 80-85771-70-5.
11. ČSN EN ISO 6520-1. *Svařování a příbuzné procesy - Klasifikace geometrických vad kovových materiálů - Část 1: Tavné svařování*. 1. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008. Třídící znak 05 0005.
12. ČSN EN ISO 17637. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Vizuální kontrola tavných svarů*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 1180.
13. Na svary. *KMITEX* [online]. Praha: KMITEX s.r.o., c2018 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://eshop.kmitex.cz/137-na-svary>
14. Endoskopy a teploměry. *BOVRAM* [online]. BOVRAM.cz, c2021 [cit. 2021-04-04]. Dostupné z: <https://www.bovram.cz/endoskopy-a-teplomery/>
15. ČSN EN ISO 3452-1. *Nedestruktivní zkoušení - Kapilární zkouška - Část 1: Obecné zásady*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2015. Třídící znak 01 5018.
16. KOPEC, Bernard, Pavel MAZAL a kolektiv. *Zkoušení kapilární: studijní příručka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2018. ISBN 978-80-214-5625-9.

17. ČSN EN ISO 23277. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení kapilární metodou - Stupně přípustnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak 05 1176.
18. ČSN EN ISO 3059. *Nedestruktivní zkoušení - Zkoušení kapilární a magnetickou práškovou metodou - Podmínky prohlížení*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 01 5079.
19. ČSN EN ISO 17638. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou metodou práškovou*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2017. Třídící znak 05 1182.
20. KOPEC, Bernard a kolektiv. *Magnetická prášková metoda: studijní příručka*. V Brně: Vysoké učení technické v Brně, 2018. ISBN 978-80-214-5669-3.
21. ČSN EN ISO 23278. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Zkoušení magnetickou práškovou metodou - Stupně přípustnosti*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2016. Třídící znak 05 1183.
22. Materiály permanentního magnetu. *magnet.works* [online]. Linz: magnet.works Magnet- und Industrietechnik Vertriebs GmbH [cit. 2021-04-01]. Dostupné z: <https://www.magnetworks.at/cz/prehled-produktu/permanentni-magnety/materialy-permanentniho-magnetu/>
23. Magnetické pole. *SPŠE Mohelnice* [online]. Mohelnice: SPŠE Mohelnice [cit. 2021-04-05]. Dostupné z: <http://old.spsemoh.cz/vyuka/zae/el7.htm>
24. Magnetická prášková metoda. *Wikipedie* [online]. wikipedia.org, 29. 1. 2018 [cit. 2021-04-07]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Magnetick%C3%A1_pr%C3%A1kov%C5%A1kov%C3%A1_metoda
25. KOPEC, Bernard, Josef NEUGEBAUER, Pavel MAZAL a kolektiv. *Ultrazvukové zkoušení: studijní příručka*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2019. ISBN 978-80-214-5722-5.
26. ČSN EN ISO 17635. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Obecná pravidla pro kovové materiály*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 1170.
27. KOVÁČIK, Miloš, Pavol KUČÍK. *Ultrazvuková technika TOFD při určení hloubkových rozměrů vad*, *ndttrade.cz* [online]. Bratislava: Slovcert s.r.o. [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://www.ndttrade.cz/UserFiles/File/ut%20technika%20tofd%20oprava.pdf>
28. AUT-SOLUTIONS-PHASED-ARRAY-TECHNOLOGY. *AUT Solutions* [online]. Fulshear (USA): AUT Solutions Group LLC, c2021 [cit. 2021-04-08]. Dostupné z: <http://autsolutions.net/ndt-resources/aut-solutions-phased-array-technology/>
29. ČSN EN ISO 17636-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Radiografické zkoušení - Část 1: Metody rentgenového a gama záření využívající film*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 05 1150.
30. Školení, kvalifikace a certifikace pracovníků NDT ve svařování podle ČSN EN ISO 9712. *Česká svářečská společnost AWB* [online]. Praha: CWS-ANB, c2006-2021, 1. 7. 2014 [cit. 2020-12-29]. Dostupné z: <http://www.cws-anb.cz/t.py?t=2&i=458>

31. ČSN EN ISO 9712. *Nedestruktivní zkoušení - Kvalifikace a certifikace pracovníků NDT*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2013. Třídící znak 01 5004.
32. ČSN EN 10025-2. *Výrobky válcované za tepla z konstrukčních ocelí - Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2020. Třídící znak 42 0904.
33. ČSN EN 1011-1. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů - Část 1: Všeobecná směrnice pro obloukové svařování*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2009. Třídící znak 05 2210.
34. *Katalog přídavných svařovacích materiálů*. Vamberk: ESAB Vamberk, s.r.o., 2012.
35. ČSN EN ISO 5817. *Svařování - Svarové spoje oceli, niklu, titanu a jejich slitin zhotovené tavným svařováním (kromě elektronového a laserového svařování) - Určování stupňů kvality*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2014. Třídící znak 05 0110.
36. ČSN EN ISO 10675-1. *Nedestruktivní zkoušení svarů - Kritéria přípustnosti pro radiografické zkoušení - Část 1: Ocel, nikl, titan a jejich slitiny*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2018. Třídící znak 05 1178.
37. *Citace PRO* [online]. Brno: Citace.com, c2012–2020 [cit. 2021-05-20]. Dostupné z: <https://www.citacepro.com/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
d	charakteristický rozměr nelineární indikace	[mm]
e	Eulerovo číslo	[-]
f	frekvence vlnění	[Hz]
h	výška vady	[mm]
I	svařovací proud	[A]
I ₀	počáteční intenzita záření	[W·m ⁻²]
I _t	intenzita prošlého záření zeslabeného tloušťkou materiálu	[W·m ⁻²]
KV	nárazová práce	[J]
l	charakteristický rozměr lineární indikace, délka vady	[mm]
L	délka indikace	[mm]
Q	tepelný příkon	[kJ·mm ⁻¹]
R _e	mez kluzu materiálu	[MPa]
R _m	mez pevnosti materiálu	[MPa]
Š	šířka indikace	[mm]
t	tloušťka materiálu	[mm]
U	svařovací napětí	[V]
v	rychlost vlnění	[m·s ⁻¹]
v _{L1}	rychlost podélné dopadající a odražené vlny	[m·s ⁻¹]
v _{L2}	rychlost podélné lomené vlny	[m·s ⁻¹]
v _s	rychlost svařování	[mm·s ⁻¹]
v _{T1}	rychlost příčné odražené vlny	[m·s ⁻¹]
v _{T2}	rychlost příčné lomené vlny	[m·s ⁻¹]
α	úhel dopadu a odrazu podélné vlny	[°]
β	úhel lomu podélné vlny	[°]
γ	úhel odrazu příčné vlny	[°]
δ	úhel lomu příčné vlny	[°]
η	tepelná účinnost metody svařování	[-]
λ	vlnová délka vlnění	[m]
μ	zeslabovací součinitel	[m ⁻¹]
AC	střídavý proud	
MAG	svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře aktivního plynu	
MIG	svařování tavící se elektrodou v ochranné atmosféře inertního plynu	
MP	magnetické pole	
MT	magnetická prášková metoda	
NDT	nedestruktivní zkoušení	
pWPS	předběžná specifikace svařovacího postupu	
PA	svařovací poloha vodorovná shora	
PT	kapilární metoda	
RT	prozařovací metoda	
RT-CR	foliová digitální radiografie	
RT-F	filmová radiografie	
RT-S	radioskopická technika	
RTG	rentgen	
SAW	svařování pod tavidlem	
TIG	svařování netavící se elektrodou v ochranné atmosféře inert. plynu	
TOFD	ultrazvuková technika zkoušení založená na difrakci vlnění	
UV	ultrafialové	
VT	vizuální metoda	
WPS	specifikace svařovacího postupu	

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Nedestruktivní zkoušení svarů [2], [3], [4], [5], [6]	9
Obr. 2 Svarová měrka [13]	12
Obr. 3 Endoskopická kamera [14]	12
Obr. 4 Kapilární elevace kapaliny	12
Obr. 5 Průběh penetračního zkoušení 1	12
Obr. 6 Průběh penetračního zkoušení 2	13
Obr. 7 Indikace vad	13
Obr. 8 Orientace siločar MP u magnetu [23]	14
Obr. 9 Orientace siločar MP u vodiče s proudem [23]	14
Obr. 10 Rozptylové pole na vadě [24]	15
Obr. 11 Podélné vlnění [1]	15
Obr. 12 Příčné vlnění [1]	15
Obr. 13 Rozhraní prostředí [1]	16
Obr. 14 Zkoušení odrazovou technikou [7]	16
Obr. 15 Zkoušení TOFD technikou [27]	17
Obr. 16 Indikace vad pomocí TOFD [1]	17
Obr. 17 Phased Array technika [28]	17
Obr. 18 Princip radiografických technik [29]	18
Obr. 19 Radioskopické zkoušení [7]	19
Obr. 20 Značení radiogramu [7]	19
Obr. 21 Svařené vzorky	21
Obr. 22 Geometrie svarových ploch dle vytvořených pWPS	21
Obr. 23 Geometrie svarových ploch dle podnikové WPS	21
Obr. 24 Nalezené vady VT	23
Obr. 25 Vady indikované PT	24
Obr. 26 Měrka MTU-3	24
Obr. 27 Lícové strany vzorků při MT	25
Obr. 28 Označení vzorku 1 před zahájením prozařování	25
Obr. 29 Radiogramy svarů	26
Obr. 30 Detailní radiogramy svarů	26
Obr. 31 Plazmové řezání	267
Obr. 32 Dělení kotoučem	267
Obr. 33 Leptání	267
Obr. 34 Vybroušené a naleptané vzorky	267
Obr. 35 Detail 1	268
Obr. 36 Detail 2	268
Obr. 37 Detail 3	268
Obr. 38 Detail 4	268
Obr. 39 Detail 5	28

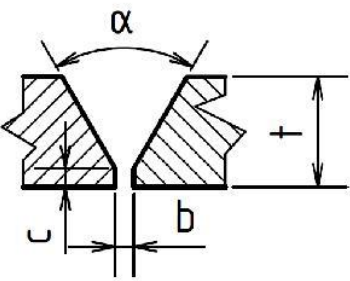
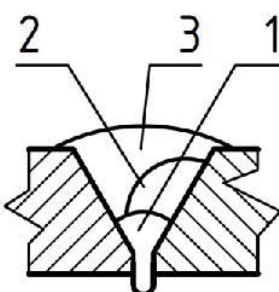
SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Volba norem pro zkoušení a hodnocení svarů UT technikami. [26].....	17
Tab. 2 Volba norem pro zkoušení a hodnocení svarů RT technikami. [26].....	20
Tab. 3 Shrnutí NDT metod.	20
Tab. 4 Chemické složení oceli S235JR. [32].....	21
Tab. 5 Mechanické vlastnosti oceli S235JR. [32]	21
Tab. 6 Svařovací parametry vzorků.....	22
Tab. 7 Přípustnost vad při VT.	23
Tab. 8 Přípustnost indikací vad při PT.	24
Tab. 9 Přípustnost vad při RT.....	27

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Předběžná specifikace postupu svařování spoje 1 „pWPS1“
Příloha 2	Předběžná specifikace postupu svařování spoje 1 „pWPS2“
Příloha 3	Specifikace použitého přídavného materiálu pro svařování [34]

Príloha 1 Predbežná specifikace postupu svařování spoje 1 „pWPS1“

Specifikace postupu svařování „pWPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)				Strana: 1 Celkem: 1 Revize č.:	
1. Výrobce :		10. Zkušební organizace :			
2. Místo : Brno		11. Způsob přípravy úkosu : obrábění, broušení			
3. Číslo dokladu (WPS) : pWPS1		12. Způsob čištění : kartáčování, odmaštění			
4. Číslo WPQR : —		13. Specifikace základních materiálů			
5. Číslo zkušebního kusu : —		- materiál 1: ocel S235JR			
6. Kvalifikace svářeče : —		- materiál 2: ocel S235JR			
7. Metoda svařování : 135		14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 12 mm			
8. Druh svaru : V svar		15. Vnější průměr [mm] : —			
9. Údaje o přípravě svarových ploch : —		16. Poloha svařování : PA			
17. Tvar spoje		18. Rozměry		19. Postup svařování	
		t [mm]			
		12			
		b [mm]			
		2			
		c [mm]			
		2			
		α [°]			
		60			
20. Parametry pro svařování					
21. Svarová housenka	1	2	3		
22. Metoda svařování	135	135	135		
23. Průměr přidav.mater. [mm] - Ø	1,0	1,0	1,0		
24. Svařovací proud [A]	90	110	130		
25. Svařovací napětí [V]	16,5	16,9	17,6		
26. Druh proudu a polarita	= / +	= / +	= / +		
27. Přenos kovu přidavného materiálu	Z	Z	Z		
28. Rychlost podáv.drátu [m.min ⁻¹]	—	—	—		
29. Rychlost svařování [cm.min ⁻¹]	20	25	16		
30. Tepelný příkon [kJ.mm ⁻¹]	0,36	0,36	0,69		
31. Přidavný materiál - zařazení a značka: FM1, ESAB Weld G3Si1, ČSN EN ISO 14341-A					
32. Předpis pro sušení :		—		42. Údaje o podložném kroužku :	
33. Ochranný plyn / tavidlo : M 23 (ČSN EN ISO 14175)		—		43. Další informace : Rozkvy - amplituda :	
- ochranný plyn [l.min. ⁻¹]:		16		- frekvence a doba prodlevy :	
- ochrana kořene [l.min. ⁻¹]:		—		Rozkvy (max. šířka housenky) :	
34. Wolfram.elektroda, druh/průměr :		—		44. Údaje pro pulzní svařování :	
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene:		—		45. Údaje pro plazmové svařování :	
36. Teplota předehřevu [°C]:		—		46. Úhel nastavení hořáku :	
37. Interpass teplota [°C]:		—		47. Druh automatu a svař. hlavy :	
38. Tepelné zpracování / stárnutí :		—		—	
39. Doba, teplota, postup :		—		48. Prokování svaru :	
40. Rychlost ohřevu a chladnutí :		—		49. Poznámky :	
50. Výrobce		52. Zkušební orgán nebo technická dozorcí (inspekční) organizace			
51. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru		53. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu			

Príloha 2 Predbežná specifikace postupu svařování spoje 1 „pWPS2“

Specifikace postupu svařování „pWPS“ dle ČSN EN ISO 15609 - 1 (Obloukové svařování)						Strana: 1 Celkem: 1 Revize č.:
1. Výrobce :			10. Zkušební organizace :			
2. Místo : Brno			11. Způsob přípravy úkosu : obrábění, broušení			
3. Číslo dokladu (WPS) : pWPS2			12. Způsob čištění : kartáčování, odmaštění			
4. Číslo WPQR : —			13. Specifikace základních materiálů			
5. Číslo zkušebního kusu : —			- materiál 1: ocel S235JR			
6. Kvalifikace svářeče : —			- materiál 2: ocel S235JR			
7. Metoda svařování : 135			14. Svařovaná tloušťka [mm]: t = 12 mm			
8. Druh svaru : V svar			15. Vnější průměr [mm] : —			
9. Údaje o přípravě svarových ploch : —			16. Poloha svařování : PA			
17. Tvar spoje			18. Rozměry		19. Postup svařování	
			t [mm]			
			12			
			b [mm]			
			2			
			c [mm]			
			2			
			α [°]			
			60			
20. Parametry pro svařování						
21. Svarová housenka	1	2	3	4		
22. Metoda svařování	135	135	135	135		
23. Průměr přídav. mater. [mm] - Ø	1,0	1,0	1,0	1,0		
24. Svařovací proud [A]	110	125	125	130		
25. Svařovací napětí [V]	16,9	17,3	17,3	17,6		
26. Druh proudu a polarita	= / +	= / +	= / +	= / +		
27. Přenos kovu přídavného materiálu	Z	Z	Z	Z		
28. Rychlost podáv. drátu [m.min ⁻¹]	—	—	—	—		
29. Rychlost svařování [cm.min ⁻¹]	20	23	23	18		
30. Tepelný příkon [kJ.mm ⁻¹]	0,45	0,45	0,45	0,61		
31. Přídavný materiál - zařazení a značka: FM1, ESAB Weld G3Si1, ČSN EN ISO 14341-A						
32. Předpis pro sušení : —			42. Údaje o podložném kroužku : —			
33. Ochranný plyn / tavidlo : M 23 (ČSN EN ISO 14175)			43. Další informace : Rozkvy - amplituda : —			
- ochranný plyn [l.min. ⁻¹] : 4			- frekvence a doba prodlevy : —			
- ochrana kořene [l.min. ⁻¹] : —			Rozkvy (max. šířka housenky) : —			
34. Wolfram.elektroda, druh/průměr : —			44. Údaje pro pulzní svařování : —			
35. Údaje o drážkování/podlož. kořene: —			45. Údaje pro plazmové svařování : —			
36. Teplota předehřevu [°C] : —			46. Úhel nastavení hořáku : —			
37. Interpass teplota [°C] : —			47. Druh automatu a svař. hlavy : —			
38. Tepelné zpracování / stárnutí : —			48. Prokování svaru : —			
39. Doba, teplota, postup : —			49. Poznámky : —			
40. Rychlost ohřevu a chladnutí : —						
50. Výrobce			52. Zkušební orgán nebo technická dozorcí (inspekční) organizace			
51. datum, jméno, podpis a razítko svářečského dozoru			53. datum, jméno, podpis a razítko zkušebního orgánu			



Weld G3Si1

SFA/AWS A 5.18: ER 70S-6
EN ISO 14341A: G 3Si1

Použití:

Weld G3Si1 je poměděný drát z produkce společnosti ESAB určený pro svařování nelegovaných a nízko legovaných uhlík-manganových konstrukčních ocelí metodou MAG. Weld G3Si1 má širší chemické složení než naše prémiové dráty OK Autrod 12.51 a OK AristoRod 12.50, jeho svařovací vlastnosti se blíží možnostem těchto drátů. Typické použití tohoto drátu je při výrobě ocelových konstrukcí. Je vhodný pro svařování koutových a tupých svarů ve všech svařovacích polohách. Lze svařovat jak v atmosféře směšného plynu Ar/CO₂, tak i v čistém CO₂.

Vhodnost pro svařování, např.:

P/S 235 až P/S 420

Klasifikace, certifikace:

CE EN 13479

Ochranný plyn (EN ISO 14175):

M21, C1

Klasifikace svarového kovu:

EN ISO 14341-A G 38 2 C1 3Si1
EN ISO 14341-A G 42 3 M21 3Si1

Svařovací proud:

Typické chemické složení drátu (%):

C	Si	Mn
0,11	0,85	1,30

D

Polohy svařování:



Typické mechanické hodnoty čistého svarového kovu:

Podmínky	Stav	Plyn	R _{eL} MPa	R _m MPa	A ₄ (A ₅) %	Z %	KV (J)/°C		
							+20	-20	-30
EN	TZ 0	M21	470	560	26	68	130	90	70
EN	TZ 0	C1	440	540	25	70	110	70	

Svařovací parametry a orientační výkonové hodnoty:

Ø d (mm)	Proud (A)	Napětí (V)	Výtěžnost svar. kovu g/100g drátu	Spotřeba plynu (l/min)	Rychlost podávání (m/min)	Výkon svařování (kg/h)
0,8	60 - 200	18 - 24	95	14	3,2 - 13,0	0,8 - 3,0
1,0	80 - 300	18 - 32	96	14	2,7 - 15,0	1,0 - 5,6
1,2	120 - 380	18 - 34	97	18	2,7 - 15,0	1,3 - 8,0