



Friction Stir Welding European Qualifications

EURÓPSKY ŠPECIALISTA (EFSW-S) A INŽINIER (EFSW-E) PRE FSW



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



7. Kvalita

Rozsah:

7.1 Deštruktívne skúšanie

7.2 Normy pre deštruktívne skúšanie a kritéria prijateľnosti

7.3 Nedeštruktívne skúšanie (NDT)

7.4 Normy pre nedeštruktívne skúšanie a kritéria prijateľnosti

7.5 Kalibrácia zariadení a reprodukovateľnosť

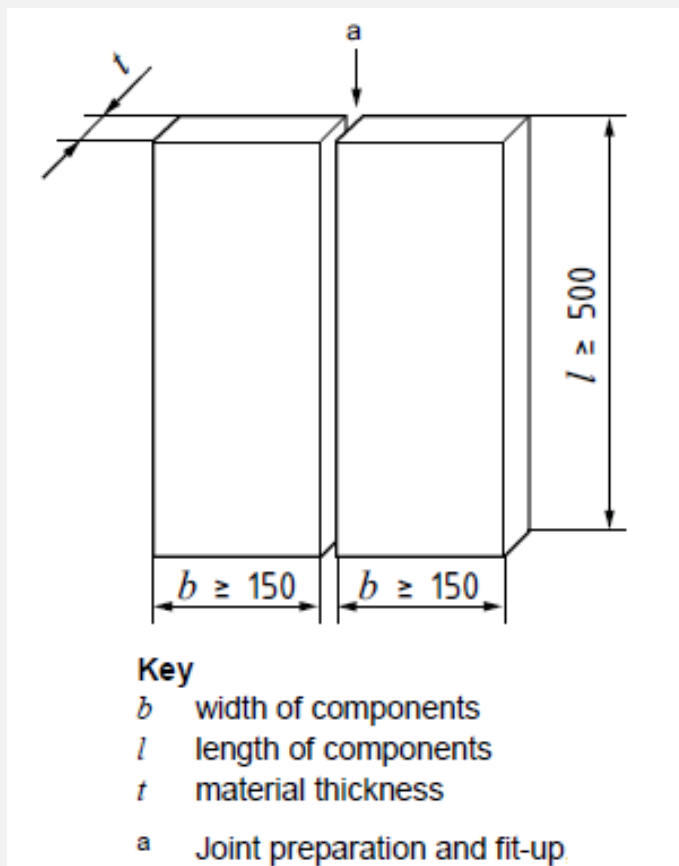
7.1 Deštruktívne skúšanie

Deštruktívne skúšanie zvarových spojov pri FSW **súvisí s kvalifikáciou zvaracieho postupu (WPQR)**. Keďže väčšina komerčných aplikácií FSW sa týka **hliníka a jeho zliatin**, existujúce normy sa zaoberajú len týmto kovom:

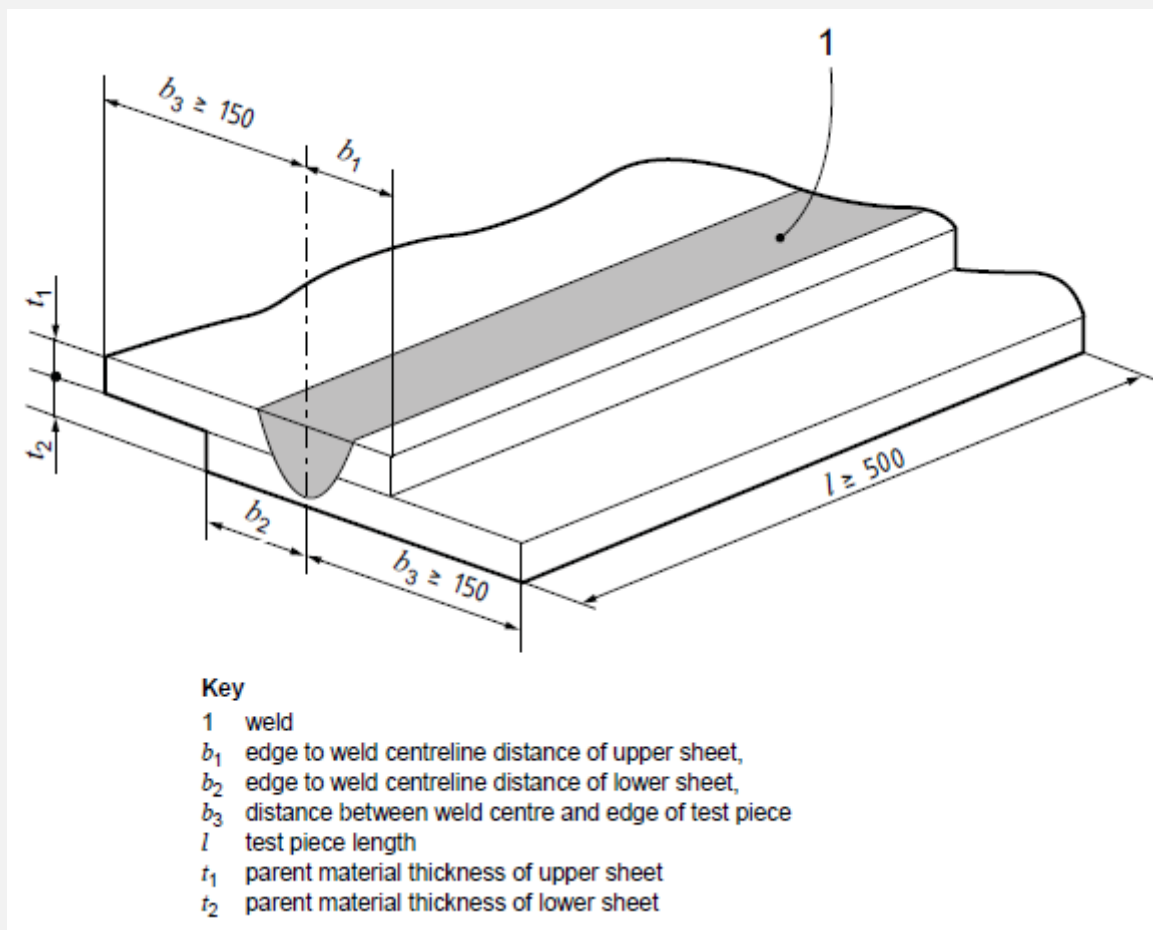
- ISO 25239-4:2011 Trecie zváranie s premiešaním – Hliník – Špecifikácia a kvalifikácia zvaracích postupov
- AWS D17.3/D17.3M:2016 Špecifikácia pre trecie zváranie s premiešaním hliníkových zliatin pre letecké aplikácie

Tieto dve normy pokrývajú oba **tupé a preplátované zvarové spoje**. **Tupé zvary predstavujú viac ako 85 % zo všetkých zvarov vyhotovených FSW metódou.**

Skúšobné vzorky (tvar a rozmery) podľa normy ISO 25339-4



Skúšobná vzorka pre tupý zvar plechu/platne s plným prievarom



Skúšobná vzorka pre preplátovaný zvarový spoj plechov

Rozsah deštruktívneho skúšania pre tupé zvary pri FSW metóde

Typ skúšky	ISO 25329-4	AWS D17.3
Skúška priečnym ťahom	2 vzorky	4 vzorky
Skúška priečnym ohybom (tvárnené materiály)	2 vzorky (koreň) 2 vzorky (čelo)	/
Lomová skúška (liate materiály)	2 vzorky (koreň) 2 vzorky (čelo)	/
Makroskopická skúška	1 vzorka	2 vzorky
Lomová húževnatosť	/	Ak treba

Špeciálne deštruktívne skúšky tupých zvarových spojov zahŕňajú:

- Únavovú skúšku
- Merania tvrdosti a mikrotvrdosti

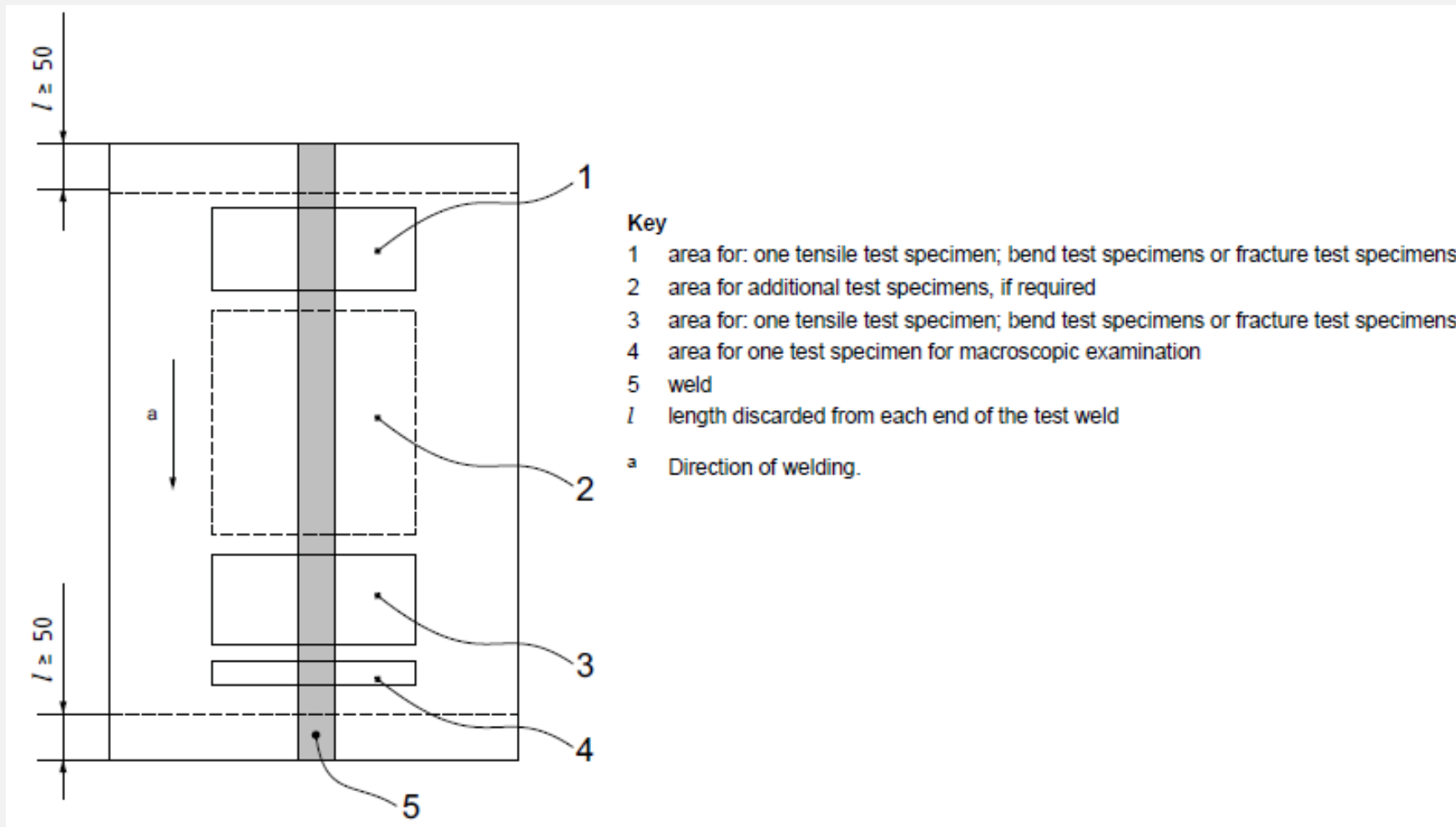
Rozsah deštruktívneho skúšania pre preplátované zvarové spoje pri FSW metóde

Typ skúšky	ISO 25239-4	AWS D17.3
Makroskopické skúmanie	2 vzorky	2 vzorky
Šmyková skúška	ak sa vyžaduje	2 vzorky
Skúška odlupovania	ak sa vyžaduje	/
S-skúška kladivom	ak sa vyžaduje	/

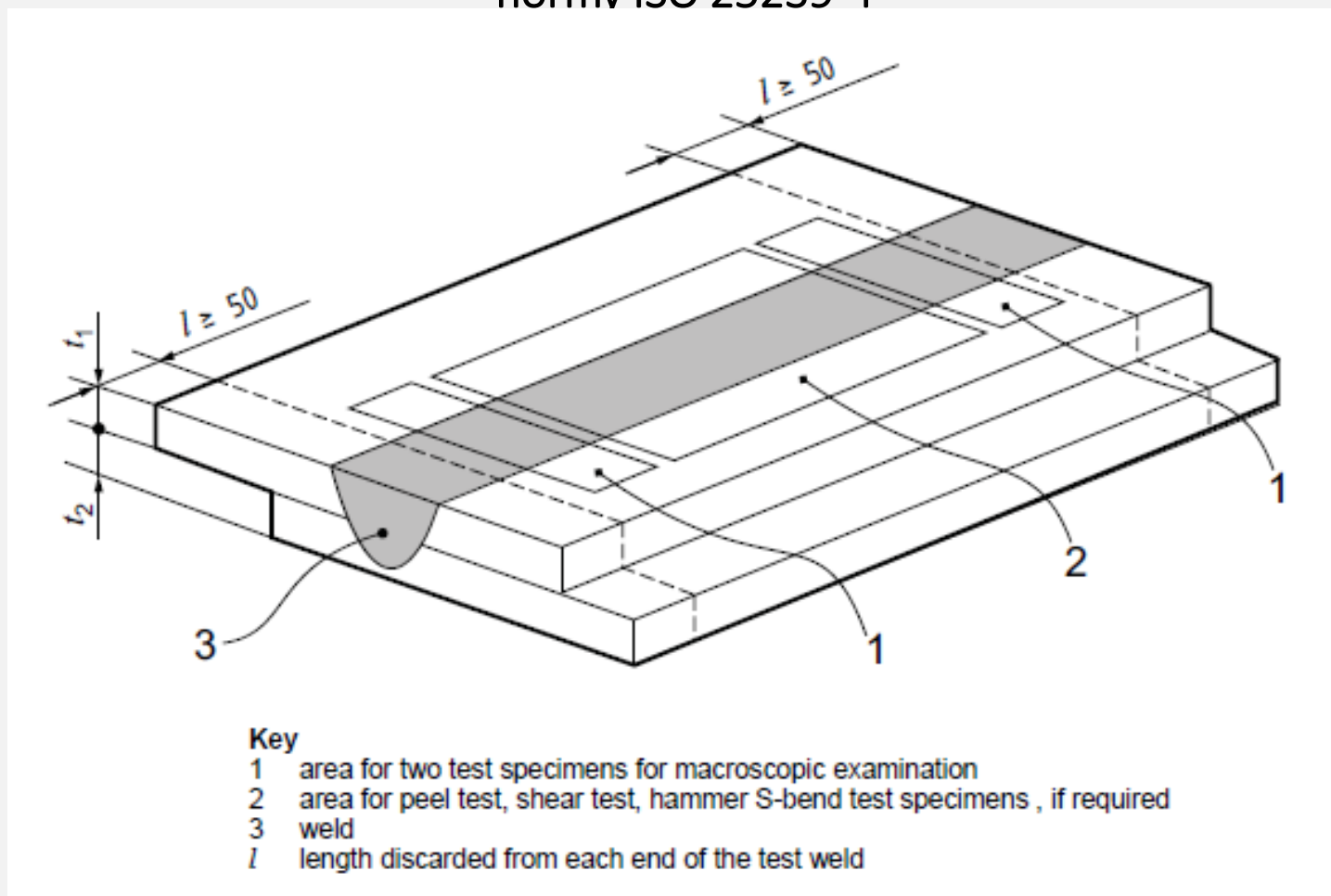
Špeciálne deštruktívne skúšky preplátovaných zvarových spojov zahŕňajú:

- Únavovú skúšku
- Merania tvrdosti a mikrotvrdosti

Umiestnenie skúšobných vzoriek tupých zvarov plechov/platní podľa normy ISO 25239-4

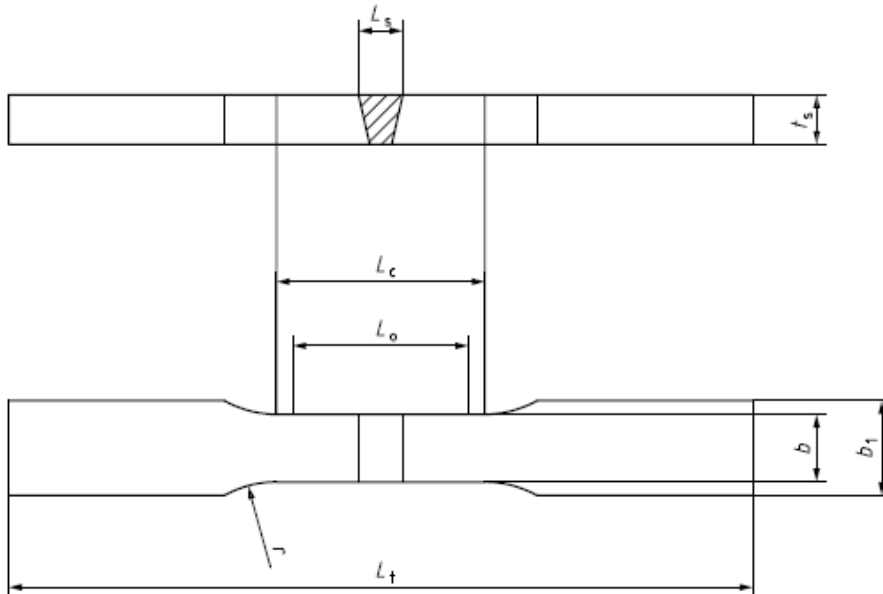


Umiestnenie skúšobných vzoriek pre preplátované zvarové spoje plechov podľa normy ISO 25239-4



7.2 Normy pre deštruktívne skúšanie a kritéria prijateľnosti

➤ Skúška priečnym ťahom tupých zvarov plechu podľa normy: ISO 4136:2012



Denomination	Symbol	Dimensions
Total length of the test specimen	L_t	to suit particular testing machine
Width of shoulder	b_1	$b + 12$
Width of the parallel length	b	12 for $t_s \leq 2$ 25 for $t_s > 2$
Parallel length ^a	L_c	$\geq L_s + 60$
Radius at shoulder	r	≥ 25

^a For some other metallic materials (e.g. aluminium, copper and their alloys) $L_c \geq L_s + 100$ may be necessary.

➤ Transverse bend testing of butt joints in plate: EN ISO 5173:2010

The advancing and retreating sides of the test specimens shall be marked prior to testing. **For all parent materials, the minimum bend angle shall be 150°**, using the calculated **maximum former diameter d** based upon the parent material minimum elongation A as (for $A > 5 \%$):

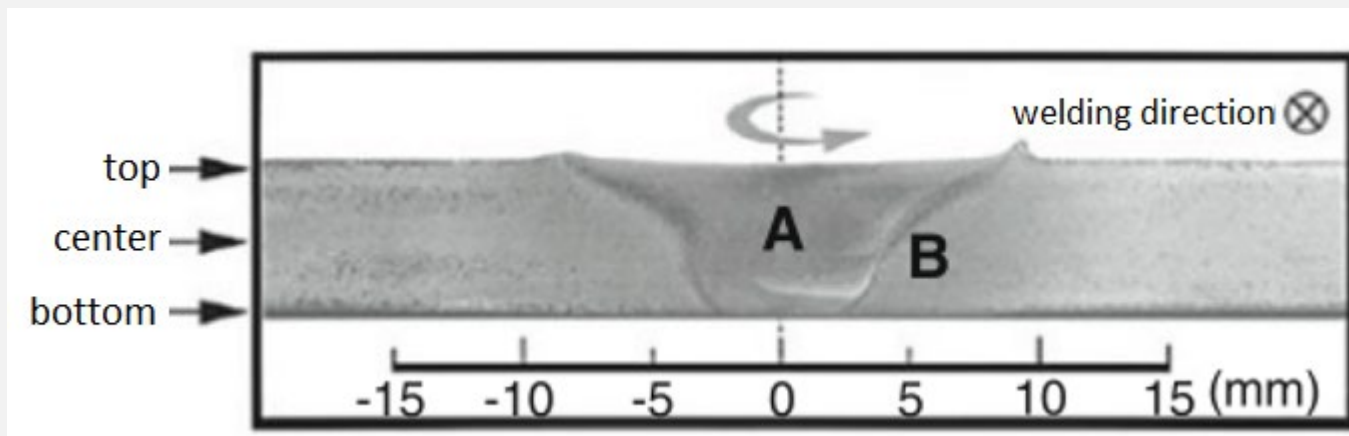
$$d = \frac{100 \times t_s}{A} - t_s$$

t_s ...thickness of the bend test specimen (this includes side bends) [mm]

For an elongation $A \leq 5 \%$, **annealing shall be carried out** before testing. The former diameter shall be calculated with the elongation given by the specified “O” temper conditions. If the bend tests fail due to grain growth that occurred during the annealing process, additional bend tests shall be performed. **During testing, the test specimens shall not reveal any single crack > 3 mm in any direction.**

➤ Makroskopické skúmanie (ME) tupých a preplátovaných zvarov: norma ISO 17639:2013

Skúšobná vzorka sa má pripraviť a skúmať **z jednej strany, aby bola jasne odhalená oblasť zvaru**. Makroskopické skúmanie má zahŕňať aj neoplyvnený základný materiál. Pri makroskopickom skúmaní pred leptaním **nesmú byť zistené žiadne trhliny**.



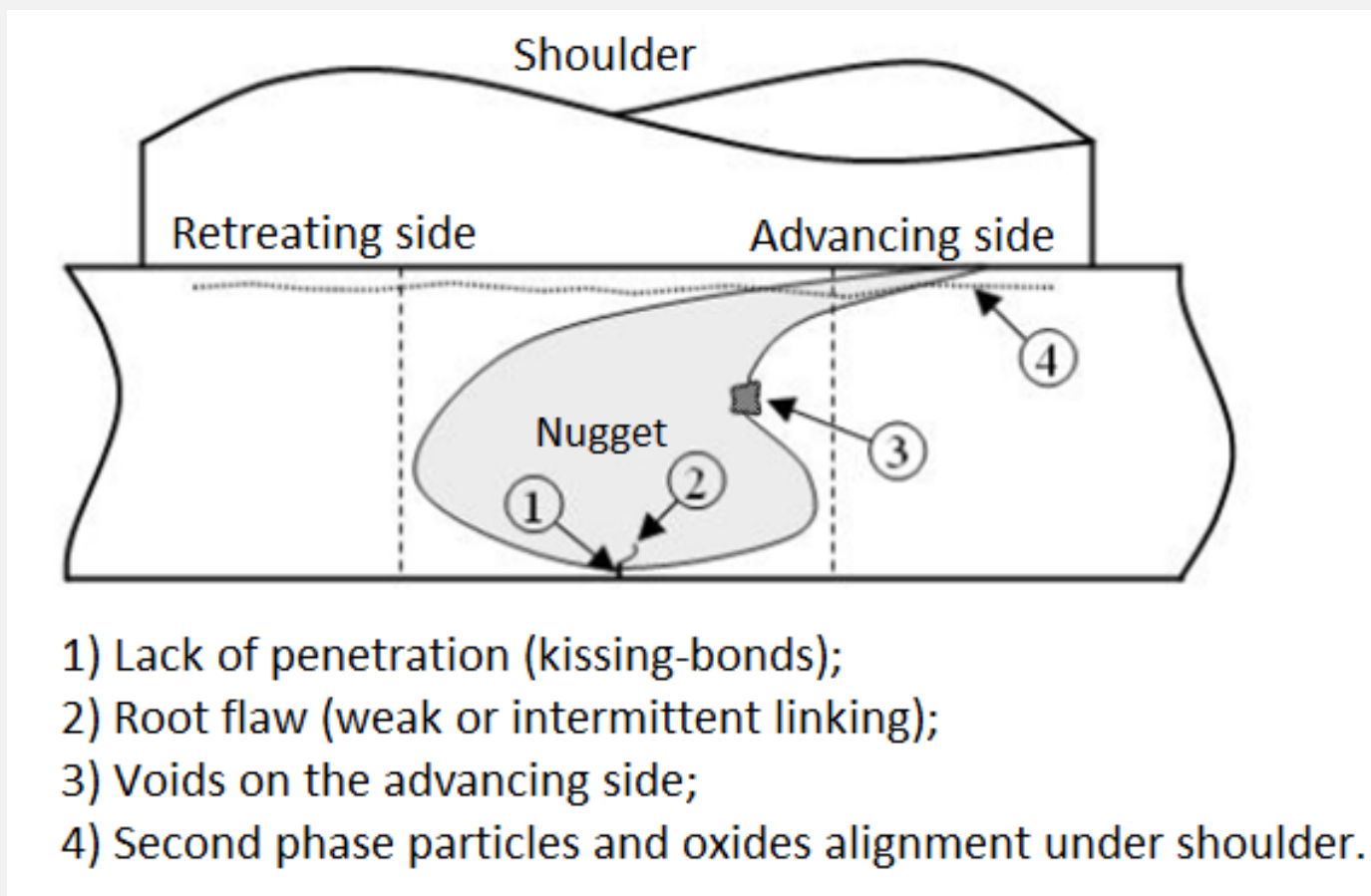
Makro skúmanie tupého FSW zvaru hliníkovej zliatiny typu AA6063-T5

- Vizuálna skúška (VT) tupých a preplátovaných zvarových spojov:
norma ISO 17637:2016

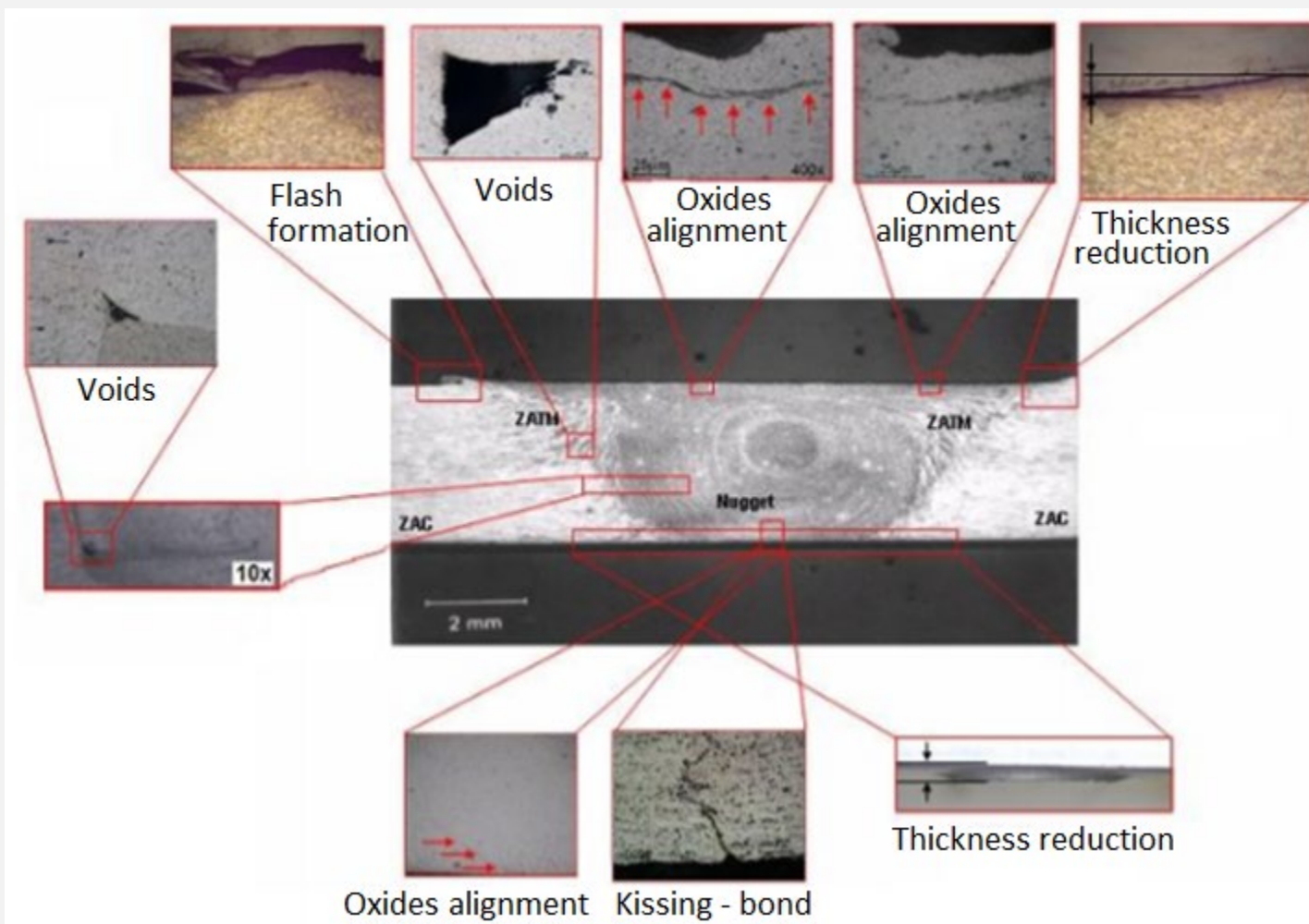
Táto skúška je **obvykle prvým** a najjednoduchším typom skúšania. VT skúška čela a koreňa zvaru **sa má vykonávať v 100 % rozsahu** na vyhotovených FWS spojoch súčastí zvarených touto metódou.

- **Pri oboch skúškach (ME, VT), majú platiť úrovne prijateľnosti podľa normy ISO 25239-5:2011, dodatok A.** Ostatné chyby musia byť v rámci špecifikovaných limitov príslušných požiadaviek alebo špecifikácii návrhu.

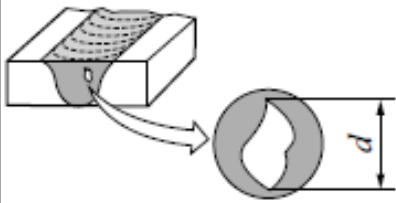
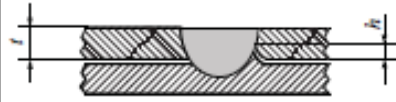
Typicke typy chýb v tupých FSW zvaroch



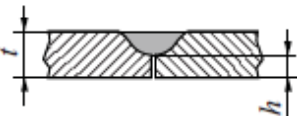
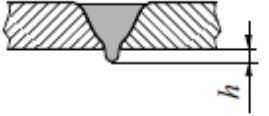
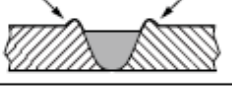
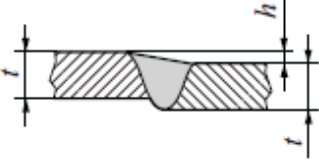
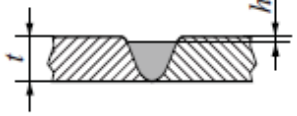
Chyby odhalené pri makroskopickom skúmaní (ME)



Vnútorne chyby a úrovne prijateľnosti pri VT a ME skúške - ISO 25239-5

Designation of imperfection	Remarks	Testing and examination in ISO 25239-4 ^a	Acceptance levels ^a	Reference number in ISO 6520-1 ^[3]
Internal imperfections				
Cavity		ME	$d \leq 0,2s$ or 4 mm, whichever is less	200
Hook		ME	— ^b	— ^c
<p>Symbols and abbreviated terms</p> <p><i>d</i> maximum transverse cross-sectional dimension of cavity (mm)</p> <p><i>h</i> height of an imperfection (mm)</p> <p><i>s</i> nominal butt weld thickness (penetration) (mm)</p> <p><i>t</i> nominal thickness of the parent material (mm)</p> <p>ME macroscopic examination</p> <p>VT visual testing</p>				
<p>^b Acceptance levels shall be within the specified limit of the relevant requirements or the design specification.</p> <p>^c See ISO 25239-1.</p>				

Povrchové chyby a úrovně přijatelnosti pri VT a ME skúške - ISO 25239-5

Designation of imperfection	Remarks	Testing and examination in ISO 25239-4 ^a	Acceptance levels ^a	Reference number in ISO 6520-1 ^[3]
Surface imperfections				
Incomplete penetration		ME	Not permitted	— ^c
Excess penetration		VT, ME	$h \leq 3 \text{ mm}$	504
Toe flash		VT, ME	— ^b	— ^c
Linear misalignment		VT, ME	$h \leq 0,2t$ or 2 mm, whichever is less	507
Underfill		VT, ME	$h \leq 0,2 \text{ mm} + 0,1t$ for $t \geq 2 \text{ mm}$: $h \leq 0,15t$ for $t < 2 \text{ mm}$	— ^c
Irregular width	Excessive variation in width of the weld	VT	— ^b	513
Irregular surface	Excessive surface roughness	VT	— ^b	514

7.3 Nedeštruktívne skúšanie (NDT)

NDT metódy používané na skúšanie FSW zvarov **sú v podstate rovnaké** ako tie, ktoré sa používajú pri iných typoch zvarov.

Povinné NDT metódy:

- Penetračná skúška (PT)
- Rádiografická skúška (RT)
- Ultrazvuková skúška (UT)

Špeciálne NDT metódy:

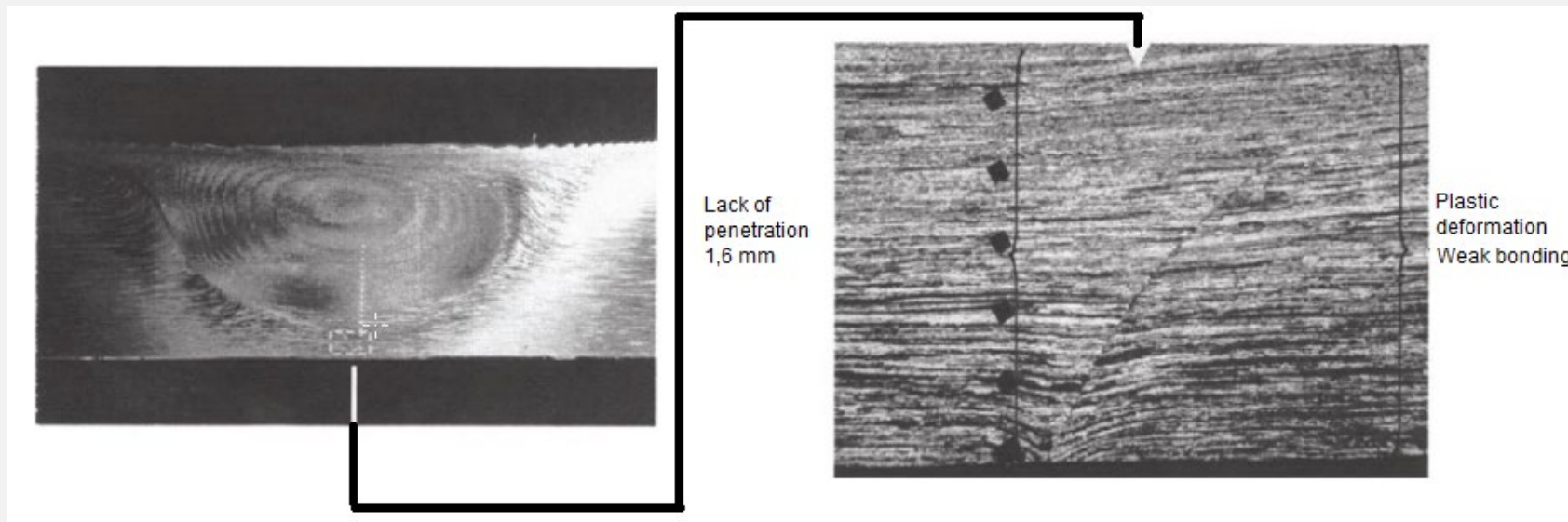
- Skúška vírivými prúdmi (ET)

➤ Penetračná skúška (PT):

Toto je bežne používaná a nenákladná metóda kontroly používaná na **zistenie chýb prenikajúcich na povrch pri všetkých neporéznych materiáloch** (kovy, plasty, keramika). PT skúška je založená na kapilárnom pôsobení, kde kvapalina s nízkym povrchovým napätím (farbivo) preniká do nečelivostí na čistom a suchom povrchu.

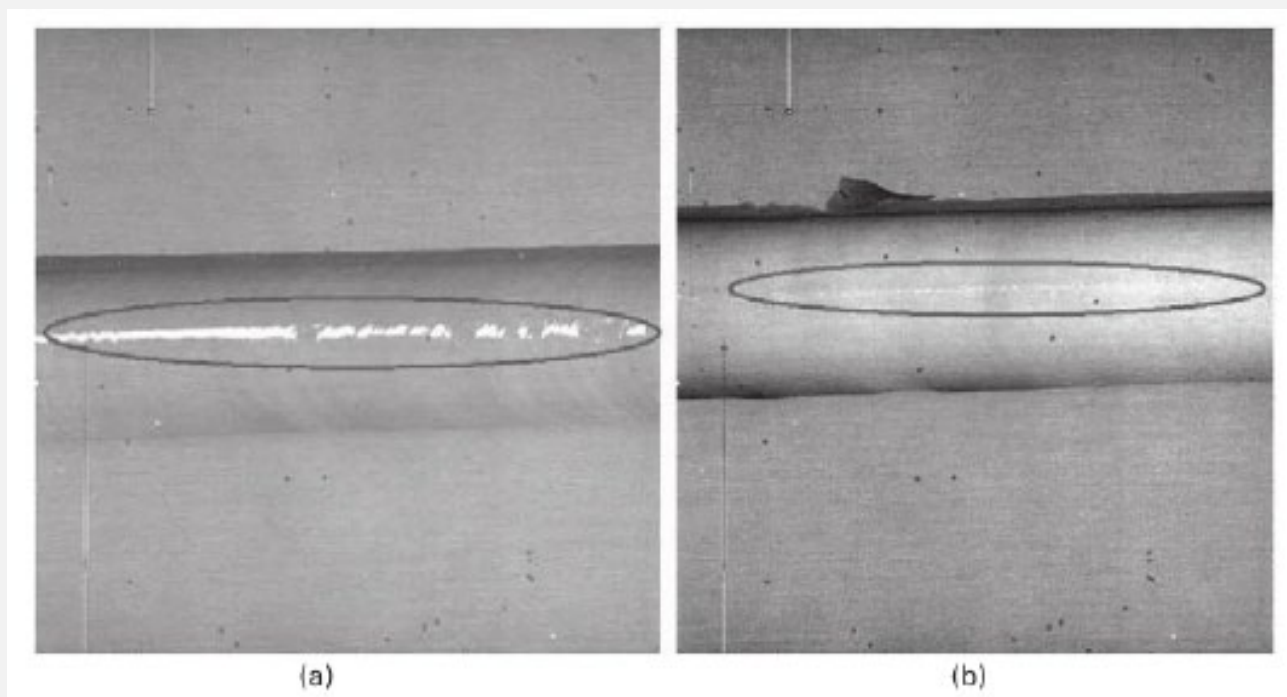
Charakteristiky PT kontroly

Applikácia (typ chýb)	Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Trhliny • Pórovitosť • Netesnosť • Rýhy • Prekrytie 	<ul style="list-style-type: none"> • Nenákladná • Citlivá • Minimálne vybavenie • Použiteľná na nepravidelné tvary • Univerzálna • Minimálny výcvik 	<ul style="list-style-type: none"> • Len neporézne povrchy • Len na zistenie povrchových chýb • Požiadavky na ventiláciu • Špinavá




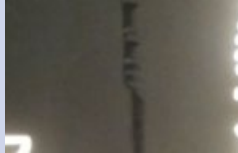

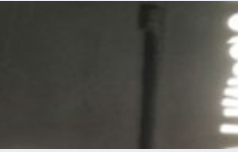

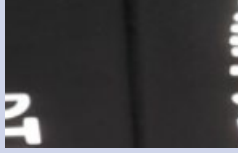

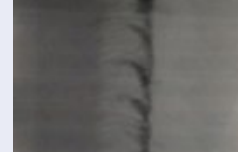
Makroskopický prierez chybou neprievaru (LOP), **odhalenou PT kontrolou**. Toto je **najbežnejšia chyba pri FSW zvaraní** a najviac ju ovplyvňuje **hĺbka ponorenia hrotu FSW nástroja**.

- Rádiografická skúška (RT): Bežne sa používa skúšanie odliatkov a zvarových spojov, najmä v prípadoch kde je kritická potreba **zabezpečiť neexistenciu vnútorných necelistvostí**.



Príklad RT skúšky s veľkými (a) a malými (b) **červími dierami** v tupom zvare Al

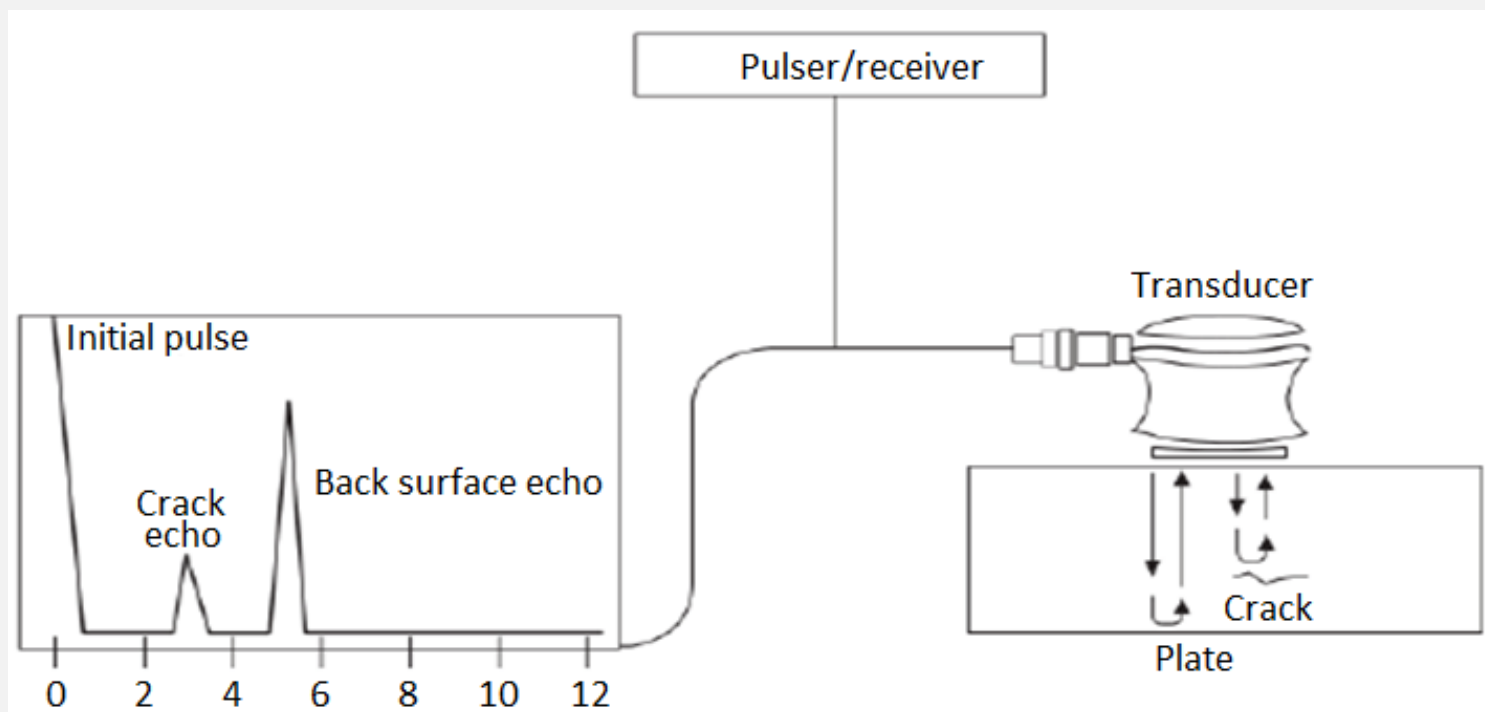
Niekoľko typických rádiogramov FSW zvarov Al-zliatin

foto zvaru	rádiogram	chyby
		<p>Neprievar, červia diera</p>
		<p>Neprievar, trhlina, dutiny</p>
		<p>Neprievar, trhlina, nedostatočné stavenie</p>
		<p>Neprievar, trhlina, nedostatočné stavenie</p>

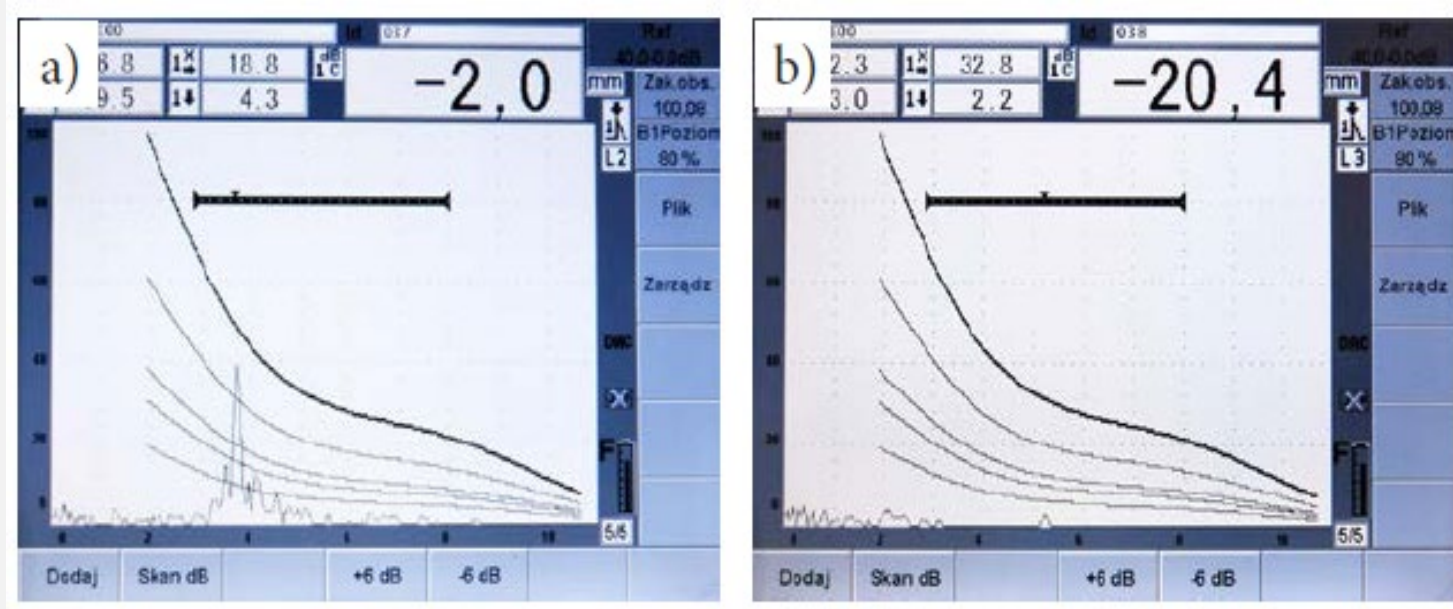
Charakteristiky RT kontroly

Aplikácia (typ chýb)	Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Thliny • Vtrúseniny • Pórovitosť • Troska • Nedostatočné stavenie • Neprievar • Netesnosti 	<ul style="list-style-type: none"> • Citlivosť na zistenie chýb vnútri materiálu • Ľahko pochopiteľný a stály záznam • Celoobjemová skúška • Prenosnosť 	<ul style="list-style-type: none"> • Riziko ožiarenia • Pomerne nenákladná • Dlhá doba prípravy • Potrebný prístup z oboch strán zvarového spoja • Nestanoví hĺbku indikácie • Vyžaduje sa vysoká zručnosť na vykonanie skúšky a vyhodnotenie výsledkov

- Ultrazvuková skúška (UT): Využíva **energiu vysokofrekvenčného zvuku** na vykonanie skúšky a stanovenie meraní. UT skúška umožňuje **zistenie vnútorných chýb**, ktoré nevychádzajú na povrch. UT skúšku možno použiť **na skúšanie spojov z jednej strany**.



Príklad UT skúšky FSW zvaru zliatiny AA6082-T6 metódou pulzného echa (A-scan)



a) so zámerne vloženou chybou priemeru 3 mm, umiestnenou v strede zvaru

b) správne vyhotovený zvarový spoj bez chýb

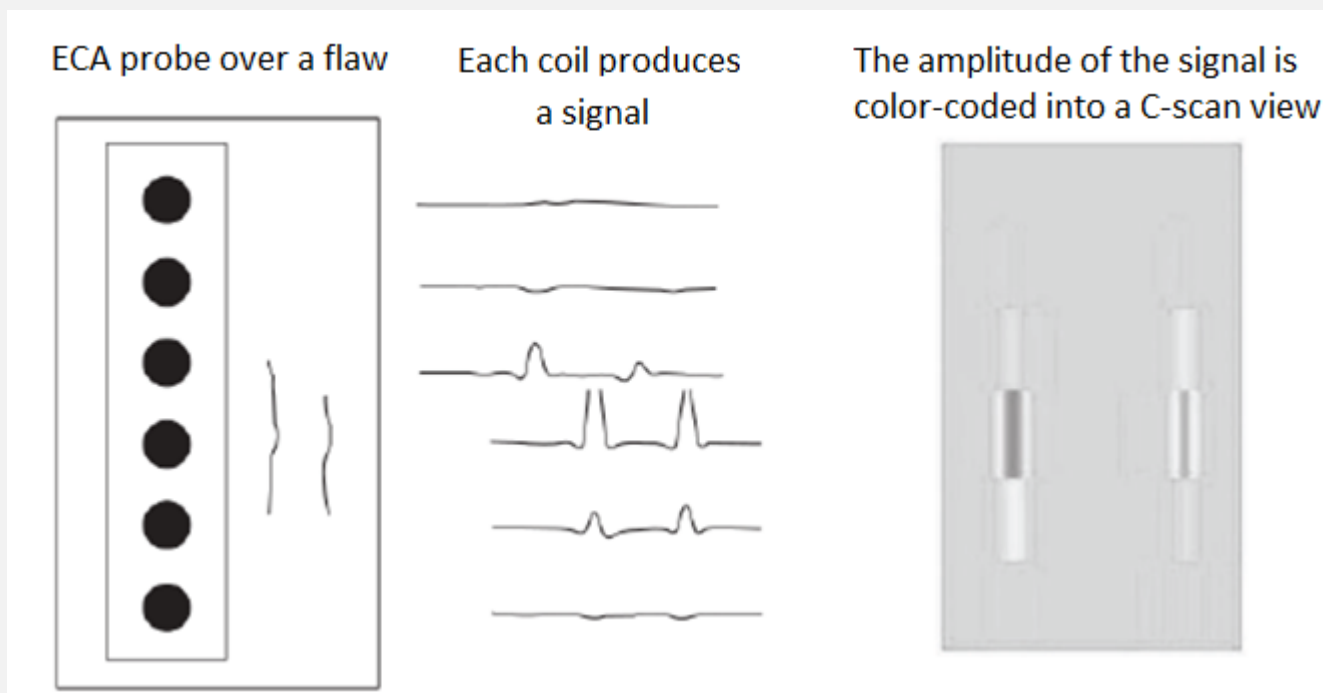
Charakteristiky UT kontroly

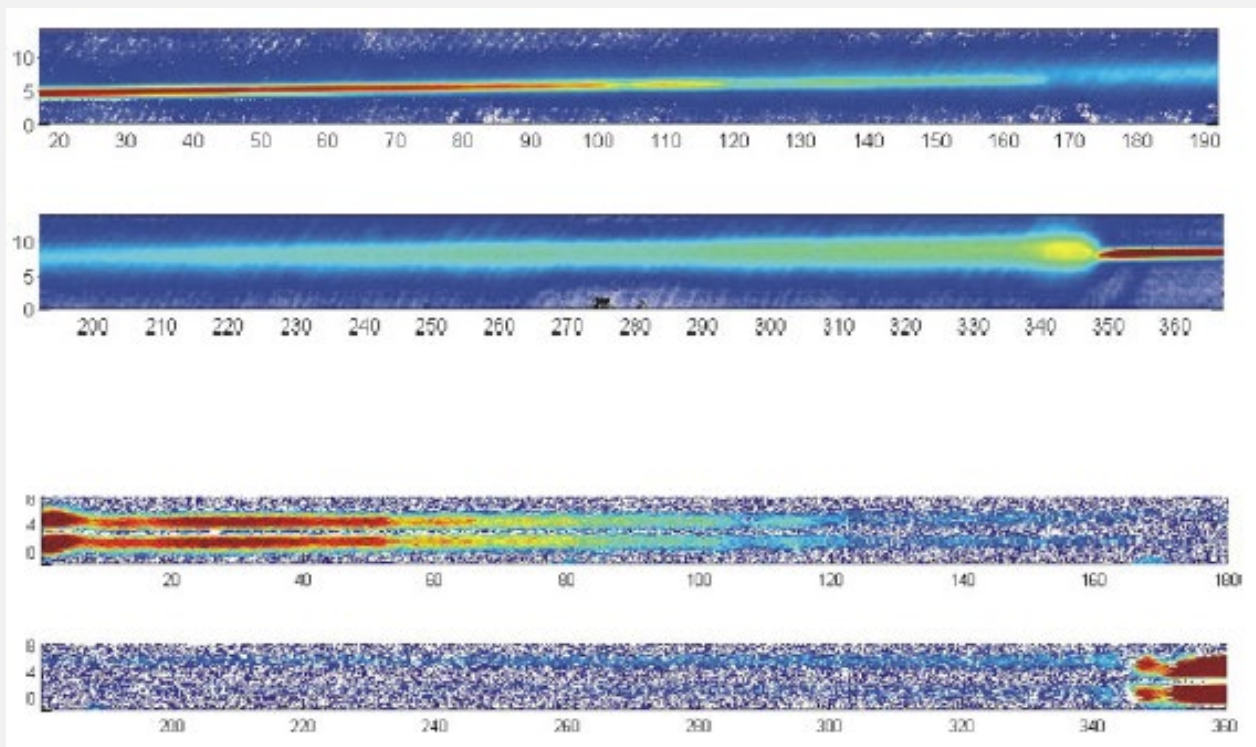
Aplikácia (typ chýb)	Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Neprievar • Červie diery • Povrchové a podpovrchové chyby • Meranie hrúbky 	<ul style="list-style-type: none"> • Rýchla metóda • Vyžaduje len jednostranný prístup • Celkoobjemové skúšanie • Vyžaduje minimálnu prípravu dielca • Okamžité výsledky • Podrobné zobrazenie možno získať automaticky • Stály záznam • Možno ju použiť aj na meranie hrúbky 	<ul style="list-style-type: none"> • Povrch musí byť prístupný a hladký • Výsledky skúšky závisia od skúseností obsluhy • Umiestnenie chyby vzhľadom k vlne ovplyvňuje zistiteľnosť • Výklad môže byť náročný • Vyžadujú sa referenčné normy a kalibračné bloky • Problémy pri zložitej geometrii zvarových spojov • Povinné použitie väzobnej kvapaliny • Nedovolené použitie UT skúšky v oblasti predošlej PT skúšky

- Skúška vírivými prúdmi (ET): Táto skúška využíva princíp elektromagnetizmu ako základ vodivej skúšky. **Vírivé prúdy sú vytvárané elektromagnetickou indukciou.** Ak sa do vodiča (medený drôt) privedie striedavý prúd (AC), tak sa v ňom a okolo neho vytvára magnetické pole. Ak sa do tesnej blízkosti striedavého magnetického poľa priblíži iný vodič, **v tomto druhom vodiči sa bude indukovať elektrický prúd.** V prípade výskytu chyby dôjde k narušeniu toku vírivých prúdov a vytvorí sa porucha magnetického poľa na povrchu skúšanej súčasti.

Frekvencia AC použitého na indukciu vírivých prúdov a elektrická vodivosť skúšaného materiálu **určuje hĺbku a prienik poľa vírivých prúdov** ako aj výslednú hĺbku skúšky. ET skúška je **povrchová a blízko povrchová metóda skúšania** v dôsledku obmedzeného prieniku vírivých prúdov do hĺbky materiálu.

Viacero sond možno integrovať do jednej skúšobnej hlavice, čím sa zvýši jej pokrytie, citlivosť a rýchlosť skúšania. **Táto metóda sa volá skúšanie vírivými prúdmi so sfázovanou zostavou (poľom).** Okrem zväčšenia povrchu pokrytého viacerými sondami **pri tejto metóde možno meniť aj frekvenciu AC na optimalizáciu citlivosti** pre oba typy chýb a to povrchových a podpovrchových. ET skúšanie FSW zvarov sa väčšinou robí touto metódou, t. j. so sfázovanou zostavou.





Hore: ET skúška ukazuje nedostatočný prievar ako tenkú čiaru smerom ku koncu zvaru

Dole: Pulzná ET skúška ukazuje neprievar v dĺžke až do 160 mm od začiatku zvaru

Charakteristiky ET skúšky

Aplikácia (typ chýb)	Výhody	Nevýhody
<ul style="list-style-type: none"> • Trhliny, vtrúseniny, vruby, diery • Neprievar • Zádery • Meranie šírky húsenice (nepriame zisťovanie vrstiev oxidov) • Povrchové a podpovrchové chyby • Veľkosť zrna, tvrdosť • Rozmery a geometria • Rozlišovanie zliatin 	<ul style="list-style-type: none"> • Rýchla • Kontrola sa robí na jeden prechod • Plné pokrytie zvarového spoja • Zobrazenie C-scanom na ľahšie vyhodnotenie indikácií • Jednoduchosť obsluhy • Dostupnosť automatizácie • Trvalý záznam • Nie je nutný dotyk so vzorkou 	<ul style="list-style-type: none"> • Manuálne skúšanie povrchu je pomalé • Výklad môže byť náročný • Hĺbka prieniku je obmedzená • Orientácia chyby je kritická • Vzorka musí byť elektricky vodivá • Citlivá na mnohé parametre vzorky • Drsnosť povrchu môže zapríčiniť nerelevantné indikácie

7.4 Normy pre nedeštruktívne skúšanie a kritéria prijateľnosti

➤ Penetračná skúška (PT), metóda:

ISO 3452-1:2013 NDT- Penetračná skúška – Všeobecné princípy

➤ Rádiografická skúška (RT), metóda:

ISO 17636-1:2013 NDT zvarov – Rádiografická skúška, technika prežarovania roentgenovými a gama lúčmi s filmom

ISO 17636-2:2013 NDT zvarov – Rádiografická skúška prežarovaním roentgenovými a gama lúčmi s digitálnymi detektormi

Ultrazvukovú skúšku (UT) možno použiť namiesto radiografickej skúšky (RT) ak je špecifikovaná špecifikáciou návrhu alebo konštrukčnými výkresmi.

➤ Ultrazvuková skúška (UT), metóda:

Norma ISO 17640:2017 NDT zvarov – Ultrazvuková skúška - Techniky,
Úrovne skúšania a vyhodnotenie

➤ Skúška vírivými prúdmi (ET), metóda:

Norma ISO 17643:2015 NDT zvarov – Skúška vírivými prúdmi zvarov v
zložitej rovine

➤ Úrovně přijatelnosti pro všechny metody NDT:

ISO 23277:2015 NDT zvarov – Penetračná skúška – Úrovně přijatelnosti

ISO 10675-2:2017 NDT zvarov – Úrovně přijatelnosti pro radiografickou skúšku – Hliník a jeho zliatiny

ISO 11666:2018 NDT zvarov – Ultrazvuková skúška – Úrovně přijatelnosti

Pri **ET skúške** sa majú pre úrovně přijatelnosti použiť relevantné požiadavky alebo špecifikácie návrhu, pretože **táto metóda sa používa v prípadoch, kde sa kladú veľmi prísne požiadavky na celistvosť zvarov.**

7.5 Kalibrácia zariadení a reprodukovateľnosť

- Kalibrácia: Meradlá, mierky a ručičkové merače nainštalované na automatických, mechanizovaných alebo robotických zvaracích zariadeniach **musia byť kalibrované zaužívanými postupmi. Výrobca má ustanoviť a zdokumentovať použiteľné postupy kalibrácie.**
- Spôsobilosť a prevádzka zariadení: Zvaracie zariadenie (zvaracie stroje a FSW nástroje) **musia byť schopné vyhotovovať zvary, ktoré spĺňajú kritériá prijateľnosti špecifikované v norme ISO 25239-5 alebo AWS D17.3. Zvaracie zariadenie musí byť schopné dodržiavať kvalitu a konzistentnosť zvarov.**

- Skúška reprodukovateľnosti pre kvalifikované nastavenie zváracieho stroja sa musí vykonávať na preukázanie skutočnosti, že zváracie zariadenie môže opakovane vyhotovovať zvary, ktoré spĺňajú kritériá prijateľnosti uvedené v norme ISO 25239-5 alebo AWS D17.3.
- Skúšky reprodukovateľnosti sa musia vykonávať ak sa vyskytne ktorákoľvek s nasledujúcich situácií:
 - kritická súčasť zváracieho stroja bola poškodená, opravená alebo vymenená
 - Ak pri zváraní v rámci pracovného rozsahu stroja výrobca stanoví rozdielnu tuhosť stroja v porovnaní s pôvodnou kvalifikáciou, čoho dôsledkom sú neprijateľné zvary

Skúška reprodukovateľnosti sa má vykonávať v súlade s WPS, ktorá bola pre tento stroj použitá pri výrobe. Majú sa pritom vyhotoviť za sebou minimálne tri zvary.



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Friction Stir Welding European Qualifications

Vďďaka za Vašu pozornosť!