

Capitolul 1. Noțiuni de defectologie

1. DEFECTOSCOPIA NEDISTRUCTIVĂ ȘI OBIECTIVELE SALE

Controlul calității subansamblelor și produselor reprezintă una din fazele esențiale ale fabricației. Importanța controlului a crescut și crește pe măsura dezvoltării economiei, științei și tehnicii. Dintre factorii de semnificație în legătura cu intensificarea preocupărilor pentru controlul produselor se menționează:

- a) Evoluția tehnologiilor de vârf din construcțiile aerospațiale, echipamentelor pentru centrale electrice nucleare, utilaje chimice speciale etc.
- b) Intensificarea preocupărilor pentru realizarea unor produse și construcții de dimensiuni mari cum sunt: petrolierele și mineralierele, platformele de foraj marin, instalațiile termoelectrice pe lignit și șisturi bituminoase, vase de presiune pentru centrale nucleare, coloane chimice, poduri s.a.m.d.;
- c) Expansiunea procedeeleor de sudare, universalizarea sudării pentru asamblarea nedemontabilă a produselor și construcțiilor;
- d) Necesitatea asigurării protecției individuale, sociale și a mediului, prin ameliorarea calității produselor și obligativitatea garantării fiabilității acestora.
- e) Considerente tehnico-economice de reducere a greutateii specifice, folosirea înlocuitorilor de materiale deficitare, precum și necesitatea admiterii deficiențelor în limite acceptabile, ca rezultat inerent al aplicării tehnologiilor de prelucrare a semifabricatelor, inclusiv a tehnologiilor de sudare, într-o nouă concepție de proiectare constructiv – tehnologică cunoscută sub denumirea de „fitness for purpose” în care toate etapele de la concepția și până la realizarea produsului sunt subordonate calității și eficienței acesteia.

În asemenea conjunctură, asigurarea calității produselor este riguros condiționată de aplicarea și promovarea unor metode și tehnologii moderne eficiente și sigure, de control și testare pe toată durata execuției și a exploatării. Expansiunea procedeeleor tehnologice moderne, apariția și extinderea procedeeleor neconvenționale, cuprinderea practică a tuturor materialelor în sfera de interes, a condus de asemenea la dezvoltarea și diversificarea rapidă a metodelor defectoscopiei nedistructive. Mai mult chiar, se poate aprecia pe bună dreptate că propulsorul defectoscopiei nedistructive îl reprezintă astăzi acele tehnologii, care operează cu cele mai fine imperfecțiuni de materiale. Astfel, ca o extindere a controlului vizual de suprafață s-a dezvoltat cu precădere metoda cu lichide penetrante de contrast, metodele magnetice bazate pe câmpul de dispersie, variația permeabilității, curenți turbionari, etc. Ca metode de control de adâncime se detașează metoda ultrasonică, în acest sens se consideră remarcabile eforturile ultimilor ani în direcția dezvoltării imaginii discontinuităților, prelucrarea automată a rezultatelor cu ajutorul calculatorului.

Notabil este aportul metodelor de control cu radiații penetrante γ și gama, atât prin industrializarea și comercializarea izotopilor radioactivi de mare activitate, cât și prin mărirea durabilității tuburilor röntgen, miniaturizarea petelor focale ale acestora, precum și

prin construirea acceleratoarelor liniare și circulare destinate defectoscopiei pieselor de grosime mare. Progrese relevante s-au obținut în ceea ce privește dezvoltarea radiografiei în timp real ceea ce facilitează monitorizarea proceselor de prelucrare și în special a procedeele de sudare și posibilitatea reglării adaptive a parametrilor tehnologici.

- Defectoscopia reprezintă un ansamblu de procedee pentru examinarea materialelor, pieselor și îmbinărilor, în scopul punerii în evidență a defectelor acestora (fisuri, goluri, incluziuni etc.) prin metode nedistructive.

- Scopul defectoscopiei nedistructive este de a decela cu operativitate defectele, a le determina natura și parametrii acestora: poziția, orientarea și mărimea și de a emite decizii de acceptare, remediere sau refuz, în concordanță cu criteriile de admisibilitate sau limitele de admisibilitate prescrise în documentații de execuție, norme și standarde. Stabilirea naturii defectului este deosebit de utilă în identificarea cauzelor și fixarea măsurilor de corectare a execuției sau a tehnologiei. Aflarea celorlalți parametri ai defectului se impune în vederea indicării cu exactitate a locului și extinderii remedierii. Dezvoltarea impetuoasă a defectoscopiei nedistructive pe terenul tot mai extins al pretențiilor pentru calitate și rentabilitate, are ca principal argument eficiența economică. Ea rezultă, în primul rând, pe cale directă prin:

- reducerea cheltuielilor materiale, a forței de muncă și a timpului afectat controlului;
- reducerea duratei de folosire a tehnologiilor active de execuție;
- mărirea productivității și ritmicității muncii;
- preîntâmpinarea pierderilor în producție și în exploatare, prin eliminarea în faze timpurii de execuție a semifabricatelor și pieselor necorespunzătoare și micșorarea rebuturilor;
- reducerea cheltuielilor de exploatare și întreținere;
- îmbunătățirea calității produselor, prin mărirea gradului de detectabilitate a discontinuităților și a preciziei controlului.

Printre principalele resurse indirecte de eficiență economică a metodelor defectoscopiei nedistructive, se consideră:

- mărirea durabilității și fiabilității de funcționare a produselor;
- creșterea gradului de siguranță a exploatarei;
- augmentarea capacității portante a pieselor. Reducerea coeficienților de siguranță în proiectare și pe această cale economisirea materialelor:
- micșorarea gradului de risc și evitarea pierderilor provenite din avarii;
- găsirea operativă a cauzelor deficiențelor constatate și aplicarea corecțiilor necesare;
- strângerea de informații care nu pot fi obținute cu alte metode. Reducerea cheltuielilor pentru încercări de anvergură pe produse;
- posibilitatea unei predicții fundamentale a modului de comportare în exploatare și a regimurilor optime de funcționare.

În sfera avantajelor pe care le oferă, trebuie luate în considerație totodată și unele de ordin psihologic, cum ar fi: îmbunătățirea condițiilor de muncă, satisfacerea pretențiilor consumatorilor, securitate socială, protecția mediului etc. Eficiența este influențată în mare măsură de volumul producției, accesibilitatea produsului, gradul de dotare cu aparatură și accesorii a compartimentului (laboratorului de control și de gradul de calificare a personalului operator).

Mărirea nejustificată a volumului controlului, aplicarea unor metode ultra - sensibile necorelate cu nivelul de execuție și cu posibilitățile mijloacelor mai simple și mai puțin costisitoare, conduce la mărirea prețului de cost și prin aceasta la discreditarea controlului. În același sens, acționează și reducerea nejustificată a limitelor de admisibilitate a defectelor. De aceea, volumul de control și prevederile normelor de control trebuie să fie astfel stabilite încât cheltuielile totale pentru acoperirea controlului și prevenirea pierderilor în procesul de fabricație pe de o parte, și pentru lichidarea consecințelor unei eventuale avarii, pe de altă parte, să fie minime. Această condiție se exprimă prin relația pierderilor:

$$C_t = C_n p_n + C_r p_r (1 - g_d) + C_{cnd} \quad (1)$$

în care: C_t este costul total, C_n - costul nedectării, C_r costul rebutării, C_{cnd} - costul controlului nedistructiv, p_n - probabilitatea nedectării, p_r - probabilitatea rebutării iar g_d - gradul de defectare. O relație similară este reprezentată într-un sistem cheltuieli - dimensiune echivalentă a imperfecțiunii maxim admise $C=f(a_a)$, reprezentată în figura 1. Curba 1 reprezintă dependența costurilor de fabricație, iar curba 2, dependența cheltuielilor de întreținere – exploatare, în funcție de mărirea imperfecțiunii admise. Se observă că, odată cu micșorarea imperfecțiunii maxim admise, costul total crește datorită mării costului controlului și a cheltuielilor pentru suportarea rebuturilor și remedierilor. Prin mărirea imperfecțiunii maxim admise, scade costul controlului și costul remedierilor, în schimb se măresc cheltuielile de întreținere și de reînnoire a produsului, dată fiind scăderea duratei de exploatare.

Curba 3 reprezintă alura cheltuielilor totale al cărei minim determină pentru o anumită situație dimensiunile optime ale imperfecțiunii maxim acceptate.

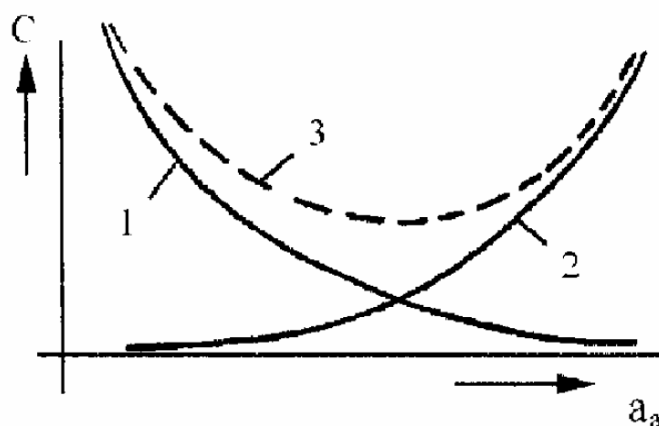


Fig. 1. Relația dintre costuri și mărirea discontinuității admise în piesă

Locul atribuit capacității de detectare a defectelor prin metode moderne de testare nedistructivă volumică de largă uzanță - radiații penetrante, ultrasunete, curenți turbionari - rezultă din schema din figura 2.

Având ca date de intrare particularitățile geometrico-dimensionale și parametri de exploatare, respectiv ca date de ieșire fiabilitatea previzionată calculată prin metodele Mecanicii ruperii, schema pune în evidență, pe de o parte determinismul capabilității de detectare pentru stabilirea criteriilor de admisibilitate a defectelor și prin aceasta a claselor

de calitate, respectiv pentru calculul de fiabilitate operațională (efectivă), iar pe de altă parte legătura biunivocă cu metodele de control.

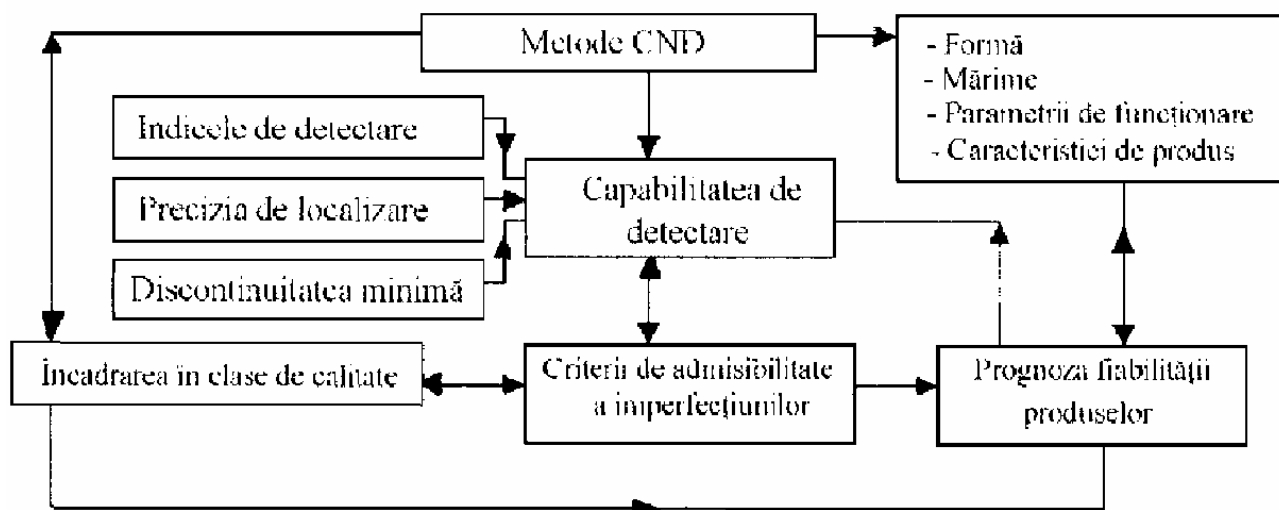


Fig. 2. Schematizarea relațiilor în sistemul de proiectare „fitnes for purpose”

O abordare de asemenea complexitate în vederea obținerii calității proiectate, fiabilității și siguranței în funcționare a condus la mărirea rolului controlului și integrarea în toate fazele de concepție, proiectare, fabricație și exploatare. Ca urmare, incidența controlului bazat mai ales pe metodele industriale pe care le oferă defectoscopia nedistructivă modernă, raportată la costul de fabricație reprezintă 4 - 6% în industria de automobile, 8 - 12% în industria aviatică, 10 - 15% în industria de utilaje chimice și energetice, 20-32% în industria componentelor pentru centrale nucleare electrice și desigur chiar mai mult în industria aerospațială.

2. IMPERFECTIUNI ȘI DEFECTE LA PIESE TURNATE, FORJATE LAMINATE ȘI LA ÎMBINĂRI SUDATE

2.1. Definiții și clasificare

- Imperfecțiunea unui material, a unei piese sau a unei îmbinări reprezintă orice abatere de la formă, dimensiuni, masă, aspect, compactitate, structură, compoziție chimică sau proprietăți mecanice și fizice, prescrise în standarde, norme de produs sau documentația de execuție.

Defectul, este imperfecțiunea care depășește mărimea admisă, în clasa de calitate prescrisă, fie în dimensiune absolută a_a , fie ca suprafață ocupată în secțiunea considerată A_a , figura 3.

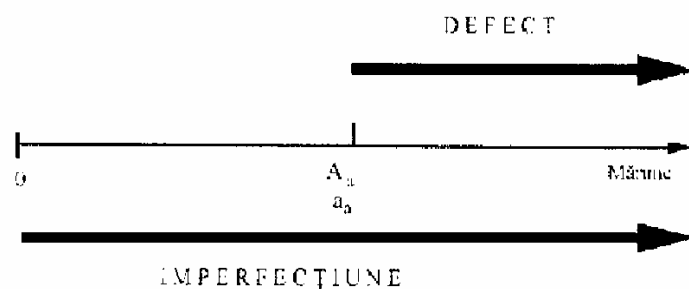


Fig. 3. Definirea imperfecțiunii și a defectului

• Discontinuitatea, cuprinde sfera imperfecțiunii, mai puțin abaterile de formă și de dimensiuni, fiind mai legată de mijloacele cu care operează defectoscopia. Noțiunea de defect al unui material sau al unei piese sau îmbinări este convențională. Funcție de destinație și de documentația tehnică, aceeași imperfecțiune putând fi considerată ca defect, deci neadmisă, respectiv admisă, conform tehnologiei stabilite, asigurându-se calitatea, fiabilitatea și funcționalitatea materialului, piesei sau îmbinării respective. Criteriile de admisibilitate a defectelor sunt stabilite prin standarde, pe clase de calitate, prin prescripții tehnice, ca manualul calității etc. Cu tot avansul tehnologic actual, numărul și diversitatea imperfecțiunilor din materiale este deosebit de pronunțată. Căutându-se concentrarea lor la maxim, s-a alcătuit tabelul I, care cuprinde principalele defecte din piese turnate DT, piese forjate, DF și laminate DL, selectate în 6 grupe definite prin standarde. În fiecare grupă sunt specificate în medie 3 - 6 categorii de defecte.

Tabelul 1

Nr. crt.	Grupa de defecte	Categorii de defecte	DT	DF	DL
1	Forme și dimensiuni necorespunzătoare	Lipsă de material	DT1.1	DF1.1	DL1.1
		Plus de material	DT1.2	DF1.2	DL1.2
		Dezaxare	DT1.3	DF1.3	DL1.3
		Bavuri, excrescențe	DT1.4	DF1.4	DL1.4
		Îndoire, curbare	DT1.5	DF1.5	DL1.5
		Umflături	DT1.6	DF1.6	DL1.6
2	Defecte de suprafață	Arsuri, țunder	DT2.1	DF2.1	DL2.1
		Imprimări	DT2.2	DF2.2	DL2.2
		Exfolieri, cruste	DT2.3	DF2.3	DL2.3
		Suprapuneri de material, dubluri	DT2.4	DF2.4	DL2.4
3	Defecte de compactitate	Fisuri, crăpături	DT3.1	DF3.1	DL3.1
		Retasuri și microretasuri	DT3.2	DF3.2	DL3.2
		Sufluri, goluri	DT3.3	DF3.3	DL3.3
		Porozități	DT3.4	DF3.4	DL3.4
		Capilarități	DT3.5	DF3.5	DL3.5
		Fulgi	DT3.6	DF3.6	DL3.6
4	Defecte de structură	Supraîncălziri	DT4.1	DF4.1	DL4.1
		Segregații și impurități	DT4.2	DF4.2	DL4.2
		Stratificări	DT4.3	DF4.3	DL4.3
		Fibraj necorespunzător	DT4.4	DF4.4	DL4.4

5	Incluziuni	Granulație necorespunzătoare	DT4.5	DF4.5	DL4.5
		Nemetalice zgură, oxizi, produse de reacție	DT5.1	DF5.1	DL5.1
6	Alte defecte	Metalice	DT5.2	DF5.2	DL5.2
		Compoziție chimică necorespunzătoare, separări	DT6.1	DF6.1	DL6.1
		Caracteristici fizico-mecanice necorespunzătoare	DT6.2	DF6.2	DL6.2
		Carburare, decarburare	DT6.3	DF6.3	DL6.3

Imperfecțiunile - defectele din îmbinările sudate, grupate de asemenea în 6 grupe după clasificarea Institutului internațional de sudura IIS/IIW. [183], sunt redată în tabelul 2.

Tabelul 2

Grupa/Categoria	100	200	300	400	500	600
Denumirea imperfecțiunii	Fisuri - Crăpături	Sufluri Cavități Retasuri	Incluziuni solide	Lipsă de topire și de pătrundere	Formă defectuoasă	Alte imperfecțiuni defecte
Nr. de tipuri	19	12	5	5	24	7

Acționând după principiul adecvării metodelor defectoscopice industriale la diversitatea fisurilor, formelor și dimensiunilor acestor imperfecțiuni și defecte s-a ajuns la următoarea grupare:

1. Discontinuități volumice - incluzionate ca gaze sau materiale solide în secțiunea piesei. În categoria acestora se consideră cele cuprinse în grupa 3 din tabelul 1, cu excepția fisurilor și crăpăturilor, cele cuprinse în grupa 5 din tabelul 1, precum și cele din grupa 200 și 300 din tabelul 2. În general, discontinuitățile volumice afectează rezistența piesei cvasiproportional cu mărimea ariei dislocate în secțiunea maxim solicitată.

2. Discontinuități plane - incluse în secțiunea piesei sau deschise la suprafață. În categoria acestora se consideră fisurile și crăpăturile cuprinse în grupa 3 de defecte în tabelul 1, unele dintre cele din grupa 2 din tabelul 1, cum ar fi suprapunerile, dublurile, și chiar unele stratificări din grupa 4 a tabelului 1, cele din grupa 100 și grupa 400 din tabelul 2, precum și unele tipuri din grupa 500, ca de exemplu creștăturile marginale. Discontinuitățile plane afectează rezistența piesei prin potențialitatea deosebită de propagare a acestora datorită efectelor de concentrare intensă a tensiunii. Potrivit teoriei Mecanicii ruperii, efectul acestor discontinuități se manifestă prin anvergura lor (lungime), dar și prin evoluția lor în adâncimea piesei (înălțime, lățime).

3. Imperfecțiuni de formă și suprafață. În categoria acestora se încadrează grupele 1 și 2 de defecte din tabelul 1, și cele cuprinse în grupa 500 și 600 din tabelul 2. Întrucât numărul de tipuri încadrate în grupa 500 din tabelul 2 este foarte mare, ele pot fi reținute compact astfel: supraînălțare și convexitate excesivă, exces de pătrundere, subțiere - supratopire și străpungere, rotire și dezaxare, suprafață reliefată, lățime neregulată, asimetrie și reluare defectuoasă. Comparativ cu discontinuitățile volumice și plane, imperfecțiunile de formă și

de suprafață pun probleme în general mai dificile metodelor defectoscopice, iar gradul de rezoluție poate să ajungă neconvingător.

2.2. Noțiuni privind morfologia imperfecțiunilor

- **Suflura, golul sau cavitatea.** Se formează prin degajare de gaze, în special de azot, hidrogen, sulf și oxigen în cursul procesului de răcire datorită scăderii solubilității acestor elemente în masa metalică odată cu răcirea soluției și înghețarea lor (incluzionarea) în masa metalică în cursul solidificării. Cantitatea de gaze depinde de raportul dintre presiunea și viteza de mișcare relativă a gazelor și viteza de formare a germenilor de cristalizare, respectiv de viteza de înaintare a frontului de cristalizare a băii. O tendință pronunțată de formare a suflurilor și porilor se manifestă la sudarea aluminiului și aliajelor ușoare, deoarece solubilitatea hidrogenului în aluminiu solid este practic nulă. După formă și distribuție în secțiune și lungime, suflurile și cavitățile pot fi de mai multe feluri. Astfel, din punct de vedere al formei se deosebesc suflurile și cavitățile sferoidale, la care lungimea axei mari nu depășește cu mai mult de 50% pe cea a celorlalte axe și suflurile, cavitățile tubulare (vermiculare), la care lungimea axei mari întrece cu peste 50% pe cea a celorlalte axe. Din punct de vedere al distribuției se deosebesc sufluri, cavități izolate uniform repartizate, aliniate, grupate și de suprafață, cunoscute și sub denumirea de pori. Cavitățile și suflurile tubulare evoluează spre suprafață pe direcția gradientului de răcire. Lungimea lor poate să atingă zeci și chiar sute de mm.

- **Retasura,** reprezintă goluri formate în urma unui proces neuniform de solidificare și a modificărilor locale de volum. Retasurile pot fi deschise sau închise, plasate de regulă la colțul pieselor. Retasura fin dispersată sau microretasura formează așa-numitele structuri poroase, care se întâlnesc frecvent la aliaje de aluminiu.

Parametrii care caracterizează suflura, cavitatea sau golul sunt: diametrul și/sau lungimea, distanța minimă între două învecinate, volumul (lungimea), care delimitează zona în care se găsesc grupate (aliniate), concentrația liniară sau concentrația volumică.

- **Incluziunea solidă.** Se formează în procesul reacțiilor de reducere din baia metalică prin separarea produselor de reacție în timpul solidificării. Având temperatura de topire mai mică decât a metalului de bază, materialele nemetalice curg în faza semifluidă a băii metalice. Dacă viteza de răcire a băii este mai mare, ele nu au timp să se ridice la suprafață, rămânând încorporate, incluzionate. Incluziunea metalică se produce în special sub formă de picături în interiorul cavităților. Incluziunile pot fi clasificate după distribuția lor în secțiune, precum și după natură. Din punct de vedere al distribuției, se deosebesc incluziuni izolate, incluziuni aliniate, incluziuni grupate. Din punct de vedere al naturii, incluziunile pot fi: de zgură, de flux cu adaosuri metalice, de oxizi de grafit sub formă de pete negre, precum și incluziuni metalice. Parametri geometrici de caracterizare sunt aceiași ca și în cazul suflurii sau cavității.

- **Fisura.** Este considerată cel mai periculos defect datorită capacității mari de propagare, fie în timp prin proces de oboseală, fie brusc în urma fragilizării. Fisura se produce în timpul solidificării (fisură la cald) sau la răcire (fisură la rece). Datorită pierderii locale a

plasticității ca urmare a fragilizării materialului în special prin hidrogenare în cursul răcirii sau a tratamentului termic. Fisura poate fi însă generată și ca urmare a nivelului ridicat de tensiuni interne de întindere, precum și datorită formării unor constituenți duri, instabili, cu coeficienți de dilatare (contractie) sensibil diferiți de cei ai matricei structurale de bază. O categorie deosebită o reprezintă fisurile inter- sau intracristaline produse de coroziunea locală sau de efectul combinat al coroziunii cu solicitarea mecanică - coroziunea tenso-fisurantă. Fisurile pot fi clasificate, atât după direcția de propagare în raport cu axa piesei, cât și după zona de localizare. Din punct de vedere al direcției de propagare, fisurile pot fi longitudinale, transversale și ramificate sau în rețea. După zona de localizare se deosebesc fisuri în materialul de bază, fisuri în zona influențată termic sau care traversează această zonă spre materialul de baza.

Parametrii geometrici de caracterizare a fisurii sunt: lungimea, adâncimea, înclinația față de axa piesei și volumul care delimitează zona de extindere a unei rețele de fisuri ramificate.

- Lipsa de topire și de pătrundere. Este o imperfecțiune tipică îmbinării sudate, fiind rezultatul amestecului necorespunzător dintre metalele ce se îmbină datorită fuziunii incomplete a unuia din componente. Ca urmare, în locul unei legături metalice se realizează o suprapunere de material separat printr-un spațiu gazos. În situații extreme materialul nici nu pătrunde în întreg volumul destinat topiturii. O formă specifică pieselor turnate o reprezintă turnarea întreruptă, iar o formă specifică pieselor laminate o reprezintă dublura.

Parametrii geometrici care caracterizează imperfecțiunea sunt: lungimea, lățimea și sau adâncimea.

- Crusta și creștătura. Reprezintă imperfecțiuni de suprafață formate din excrescențe metalice neregulate cu grosimi variabile, cu margini ascuțite, paralele la suprafața piesei și având o rugozitate pronunțată. Lângă asemenea formațiuni piesa reprezintă denivelări și creștături. Ele se formează în zone de îndesare unde dilatarea normală este împiedicată de solicitări de compresiune în peretele formei. Există o diversitate inclusiv de localizare pe suprafața superioară sau pe pereții laterali, crusta de fierbere și crusta de eroziune fiind cele mai frecvente. Creștătura produsă la sudare este cauzată de topirea excesivă a marginii rostului.

3. CALCULUL DISCONTINUITĂȚII MAXIM ADMISE

Calculul mărimii imperfecțiunii sau a discontinuității maxim admise într-un material, semifabricat sau piesă se face diferențiat în funcție de factori ca:

- starea de tensiune și modul de solicitare;
- mărimea sau nivelul solicitării, luându-se în calcul și sporul de tensiune determinat de concentrarea locală a tensiunii în prezenta defectelor;
- tipul discontinuității (volic, plan, structural), locul de amplasare (de exemplu la defecte plane: de suprafață sau îngropat);

- caracteristicile de rezistență și de tenacitate ale materialului, în special limita de curgere σ_c , energia de rupere la încovoiere prin șoc KV și tenacitatea la rupere K_{Ic} ;
- temperatura de exploatare;
- influențe suplimentare ca de exemplu coroziune sub tensiune, fluaj etc.

Un prim tablou de evaluare prin calcul a limitelor de admisibilitate a discontinuităților este prezentat în tabelul 3.

Modul de solicitare	Categorii discontinuități		Mărimea criterială	Mărimea critică	Relația de bază	Relația de calcul a mărimii critice	Mărimea admisă	Condiții suplimentare
STATICĂ	VOLUMICE		Aria	$\overline{A_d}$	Echilibru capacitate portantă statică	$\overline{A_d} = A_0 \left(1 - k_\sigma \frac{\sigma_{rMB}}{\sigma_{rMA}} \right)$	$A_a = \frac{\overline{A_d}}{C}$; $C = 3 \div 5$	$k_\sigma < 1$
	PLANE	$\sigma_{max} < \sigma_c$	Lungimea	a_c	$K_{Ic} = \sigma_c \sqrt{\pi a_c}$	$a_c = C_1 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2$	$a_a = \frac{a_c}{C}$; $C = 5$	$\sigma_{max} < \sigma_c$ - corecții funcție de poziția în secțiune
		$\sigma_{max} \geq \sigma_c$			$\delta_c = \frac{\pi \sigma_c \cdot a}{E}$	$a_c = C_2 \left(\frac{\delta_c}{\varepsilon_c} \right)$	$a_a = \frac{a_c}{C}$; $C = 5$	- corecții funcție de poziția și extinderea în secțiune
VARIABILĂ	VOLUMICE		Aria	$\overline{A_d}$	Echilibru capacitate portantă la solicit. variabilă	$\overline{A_d} = A_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_{I MB}}{k_\sigma \sigma_{rMA}} \right)^{\frac{1}{n+1}} \right]$	$A_a = \frac{\overline{A_d}}{C}$; $C = 1,5 \div 2,0$	$k_\sigma < 1$ $\frac{\sigma_{rMB}}{\sigma_{rMA}} = \frac{\sigma_{RMB}}{\sigma_{RMA}}$
	PLANE		Lungimea (Adâncimea)	a_c	$\frac{da}{dN} = B(\Delta K)^m$	$N = \frac{1}{B} \int \frac{da}{\Delta K^m}$	$a_a \rightarrow \sum_{i=1}^n N_{a+i} \Delta a > N_{ncc}$	$a < a_c \text{ rel (2)}$

3.1. Discontinuități volumice

În cazul defectelor volumice, punând condiția de egalitate între capacitatea portantă la solicitarea statică a unei îmbinări sudate cu defecte în cusătura și capacitatea portantă a componentelor sudate (fără defecte), se calculează aria limită de discontinuități A_d la care localizarea rupei tranzitează de la secțiunea materialului de bază fără defecte, către ruperea în secțiunea cusăturii cu defecte.

Experimentări efectuate la solicitări statice [122], [129], cu probe sudate cap la cap cu defecte volumice în cusătură având o arie relativă A_d/A_0 cuprinsă în limitele 0 - 17 (18)% a căror rezultate sunt prezentate în figura 4, au indicat într-adevăr o creștere monotonă a rezistenței la rupere efective σ_{rds} a îmbinării cu defecte, până la o anumită valoare a raportului A_d/A_0 situat între 5 și 8%, urmată de o scădere la valori mai ridicate, confirmând rezultatele calculului (tabelul 3, rând 1). Coeficientul β din figura 4 are valoarea $\beta = 1,14 \div 1,15$.

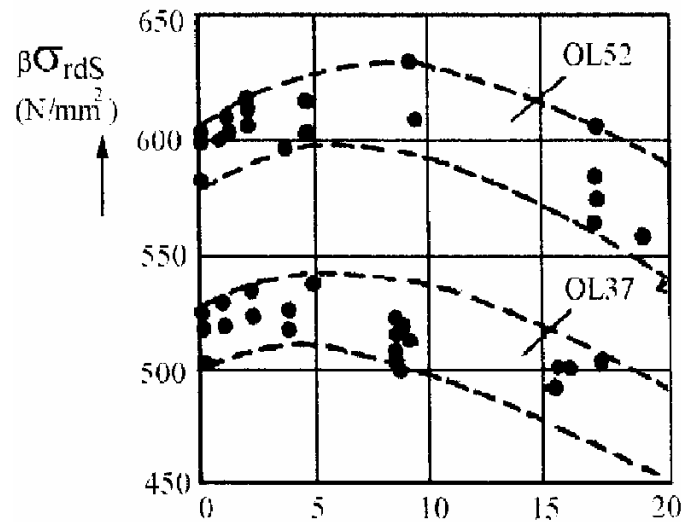


Fig. 4. Variația rezistenței la rupere statică a îmbinării sudate cu defecte volumice, funcție de mărimea relativă a ariei dislocate

În mod asemănător se poate proceda și în cazul solicitării variabile nelimitate a îmbinărilor sudate conținând defecte. Pentru a se ajunge la forma relației din tabelul 3 s-au folosit date experimentale din [2], [57], care au prefigurat dependența exponențială a rezistenței la solicitări variabile cu ciclu pulsant nul, de mărimea relativă a ariei ocupate de defect A_d/A_0 , sub forma:

$$\frac{1}{k_\sigma} = \left(1 - \frac{A_d}{A_0}\right)^n \quad (1)$$

în care exponentul $n = 8 \div 12$, putându-se admite cu buna aproximație 10.

Valoarea coeficientului teoretic de concentrare provocat de modificarea formei în zona îmbinării sudate se determină cu metoda elementelor finite [131], [132], [133], pe baza relației:

$$\alpha_k = 1 + 1,65 \sqrt{\frac{h}{s}} - 3,73 \sqrt{\frac{h}{s} \cdot \frac{b}{s}} \quad (2)$$

Relația dintre α_k și k_σ se determină experimental (paragraf 3.3). Se observă că factorul esențial în relația (2) îl constituie raportul dintre supraînălțarea cusăturii (h) și grosimea îmbinării (s). O influență mult mai mică se manifestă prin lățimea cusăturii (b).

Relația din rândul 4 al tabelului 3, referindu-se la defecte volumice, este valabilă dacă raportul dintre rezistențele la rupere statică a materialului de bază σ_{rMB} și a materialului de adaos σ_{rMA} este aproximativ egal cu raportul dintre rezistența la oboseală cu un grad de asimetrie $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ al materialului de bază σ_{rMB} și rezistența la oboseală a materialului de adaos σ_{rMA} .

În figura 5 se prezintă rezultatele sintetizate din lucrările Institutului Internațional de Sudură [77], [83], [99], care cuantifică scăderea relativă a rezistenței la oboseală pentru $N = 2 \cdot 10^6$ cicluri de solicitare a îmbinărilor sudate cu defecte volumice, cu mărirea raportului A_d/A_0 .

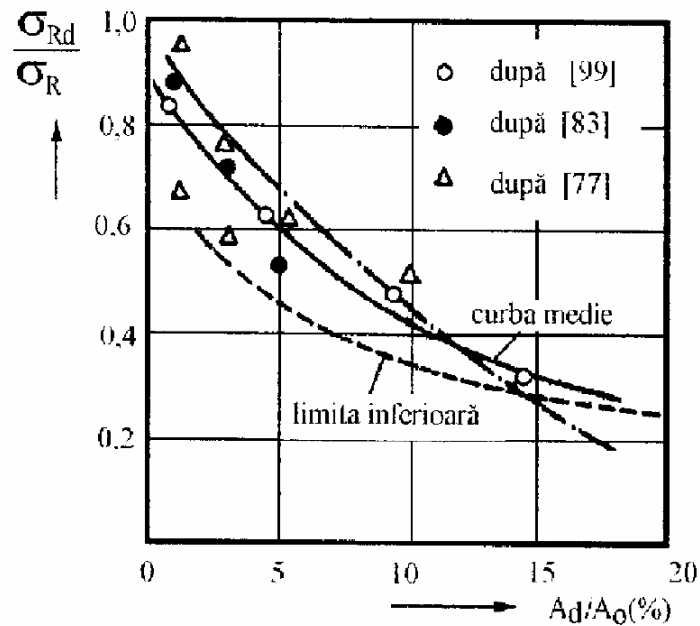


Fig. 5. Variația rezistenței la oboseală a îmbinării sudate cu defecte volumice, funcție de mărimea relativă a ariei dislocate

Curba medie din figură se exprimă cu ajutorul relației:

$$\frac{\sigma_{Rd}}{\sigma_R} = \left(1 - \frac{A_d}{A_0}\right)^8 \quad (3)$$

care este foarte apropiată de relația (1).

3.2. Discontinuități plane

În cazul defectelor plane și mai ales atunci când produsul este realizat din oțeluri de medie sau înaltă rezistență, ori supus unor stări plane sau spațiale de solicitare, eventual exploatat în vecinătatea temperaturii de ductilitate nulă NDT, [21], [126], [127], calculul mărimii defectului maxim admis se conduce pe baza relațiilor deduse din Mecanica ruperii. Tensiunea luată în considerație trebuie să fie tensiunea maximă, obținută prin însumarea componentelor:

$$\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_i + \sigma_s + \sigma_v \quad (3)$$

σ_m - tensiunea de membrană (de întindere), σ_i - componenta tensiunii de încovoiere care depășește σ_m , σ_s - tensiunea secundară provenită din greutate proprie, încărcătură etc., iar σ_v - supratensiunea definită de concentrarea efectivă a tensiunii în îmbinarea cu defecte:

$$\sigma_v = \left(\frac{1}{\sigma} - 1 \right) \sigma_m \quad (4)$$

Relația (4) este valabilă în cazul materialelor ductile la care se îndeplinește condiția ca rezistența piesei cu concentrator de tensiune $\sigma_{rk} \geq \sigma_r$ (rezistența la rupere a piesei fără concentrator de tensiune).

Procedeele diferă în funcție de valoarea lui σ_{max} , deosebindu-se următoarele situații:

- Dacă $\sigma_{max} < \sigma_c$, condițiile de solicitare fiind elastice se aplică Mecanica ruperii elastice, lineare, criteriul de referință fiind valoarea critică a tenacității la vârful fisurii, (defectului), K_{Ic} ;
- Dacă $\sigma_c < \sigma_{max} < 2\sigma_c$, condițiile de solicitare pentru zone limitate ca extindere, cu gradient ridicat, putându-se considera elasto-plastice, se aplică Mecanica ruperii elasto-plastice, criteriul de referință fiind deplasarea critică la deschiderea fisurii, δ_c (COD);
- Dacă $\sigma_{max} > 2\sigma_c$, condițiile de solicitare sunt în domeniul pur plastic, astfel încât în această situație trebuie determinată deformația plastică echivalentă din zona cu defecte.

Cazul a): $\sigma_{max} < \sigma_c$. Pentru ca ruperea să nu se inițieze la tensiuni sub tensiunea admisibilă, adică $\sigma_{max} < \sigma_c/c$, dimensiunea echivalentă a defectului maxim va fi:

$$a_c = \frac{c^2}{8\pi} \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 = C_1 \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (5)$$

unde C_1 este un coeficient care se determină [33], în funcție de valoarea raportului σ_{max}/σ_c .

Datorită unei experiențe limitate, se recomandă ca valorii critice a_c să i se aplice un coeficient de siguranță, care după [17] și [21] se ia $c_a=5$, astfel încât dimensiunea admisă a defectului plan va fi:

$$a_a = \frac{a_c}{c_a} = \frac{C_1}{5} \cdot \left(\frac{K_{Ic}}{\sigma_c} \right)^2 \quad (6)$$

Ca verificare se impune determinarea prin calcul a factorului de intensitate a tensiunii K_I după metodologia indicată în [159] și compararea cu tenacitatea la vârful fisurii K_{Ic} stabilită experimental.

În cazul defectelor de suprafață sau îngropate se recomandă folosirea relației:

$$K_I = \frac{\sqrt{a}}{q} \left[\omega_1 \cdot \sigma_m + \omega_2 \cdot \sigma_i \right] \quad (7)$$

unde mărimea defectului $a = t$, t - adâncimea defectului, pentru defecte de suprafață și $a = t/2$, pentru defecte îngropate, ω_1 și ω_2 , [21] sunt coeficienți de influență, ale căror valori se obțin din [159], în funcție de dimensiunile relative ale defectului și a poziției acestuia: t/s , p/s și t/l , iar q este un coeficient, funcție de valoarea raportului t/l , [21], [159].

În cazul defectelor plane, care cuprind parțial pe lungimea lor, l , întreaga grosime, factorul de intensitate a tensiunii se calculează cu relația:

$$K_I = 1,25 \sigma_{max} \cdot l^{1/2} \quad (8)$$

cu precizarea că, dacă defectul se află în îmbinări sudate ale unor recipiente supuse la presiune interioară, valoarea lui K_I trebuie amplificată cu un factor de corecție $f_c^{-\frac{1}{2}}$ a cărui valoare se determină din [159].

Defectele se consideră admise dacă $K_I < 0,7K_{Ic}$, al materialului în care se situează ele.

Cazul b): $\sigma_c < \sigma_{max} < 2\sigma_c$. Dimensiunea echivalentă a defectului critic va fi:

$$a_c = \frac{\pi}{8} \left[\ln \left(\sec \frac{\pi}{2c} \right) \right]^{-1} \cdot \frac{\delta_c}{\epsilon_c} = C_2 \frac{\delta_c}{\epsilon_c} \quad (9)$$

unde δ_c este valoarea critică a deplasării la vârful fisurii, COD. ϵ_c este deformația (alungirea) specifică la curgere ($\epsilon_c = \sigma_c/E$). Coeficientul C_2 se alege în funcție de raportul dintre tensiunea maximă și limita de curgere σ_{max}/σ_c conform [159], admitând pentru k_σ valoarea 3. Pe baza acelorași considerații de la cazul a), dimensiunea maximă admisă a defectului va fi:

$$a_a = \frac{a_c}{c_a} = \frac{C_2}{5} \cdot \frac{\delta_c}{\sigma_c} E \quad (10)$$

unde E este modulul de elasticitate longitudinală.

Dacă defectul este de suprafață, în funcție de mărimea relativă a defectului a_c/s și o valoare dată a raportului t/l se află t/s , rezultând astfel dimensiunile l și t , care trebuiesc considerate ca valori maxime admise în îmbinare.

Dacă defectul este îngropat, se determină valoarea $t/(2p/t)$ în funcție de mărimea relativă a defectului a_c/s la o valoare dată a raportului t/l , rezultând astfel dimensiunile l și t , care trebuie considerate ca valori maxime admise în îmbinare.

Dacă defectul cuprinde parțial întreaga grosime sau dacă se află dispus în îmbinările sudate ale unor corpuri de revoluție, valoarea lui a_c se micșorează prin multiplicare cu un factor de corecție $f_c < 1$, [159].

Cazul c): $\sigma_{max} > 2\sigma_c$. În acest caz se consideră coeficientul C_2 din relația (9) pentru valoarea experimental determinată a deformației specifice maxime relative $\epsilon_{max}/\epsilon_c$ și se stabilește prin încercări deschiderea critică la vârful fisurii δ_c , (COD).

Dacă defectul cuprinde parțial întreaga grosime și se află în îmbinări sudate ale unor corpuri de revoluție de la vase sau recipiente sub presiune, valoarea lui a_c determinată cu ajutorul relațiilor (9) și (10), trebuie micșorată prin multiplicarea cu factorul de corecție f_c , ca și în cazul b).

Suflurile și incluziunile nemetalice alungite și aliniate de o anumită densitate pot fi echivalate din punct de vedere al influenței exercitate, cu defecte plane de tipul lipsei de pătrundere [57], [68], afectând rezistența la rupere a îmbinării [107], [141], de regulă proporțional cu aria defectului.

Pentru ilustrare, în figura 6 se prezintă rezultatele experimentale obținute pe îmbinări cap la cap din OL37 cu grosimi cuprinse între 5 și 30 mm, având defecte de tipul incluziunilor, lipsei de pătrundere și lipsei de topire [122]. Se relevă o variație liniară cu o rapiditate de

$(1 - 1,2)A_d/A_0$, mai mare decât cea teoretică, valabilă pentru defecte volumice [122]. Drept parametru de caracterizare a acuității defectului se consideră în acest caz lungimea, respectiv suma lungimilor [65], [69], după regula stabilită în [65], astfel:

- dacă distanța dintre marginile a două defecte aliniate întrece $2,25s$ (s fiind grosimea sudurii) sau/respectiv $1,25 \cdot l_{\max}$, (l_{\max} fiind lungimea celui mai mare defect), atunci influența defectelor se consideră separat;

- dacă distanța dintre ele este sub valorile indicate, lungimea defectelor se consideră egală cu distanța dintre extremitățile defectelor cele mai îndepărtate.

Majoritatea cercetărilor efectuate pe oțeluri de tip 37 și de tip 52, atestă o influență nesemnificativă asupra rezistenței la rupere până la un grad de defect de aproximativ 10%, [68], [81], [121], după unii chiar până la 15% [90]. Excepție de la această evoluție se semnalează în cazul funcționării (încercării) la temperaturi foarte scăzute, [125]. Rezultatele obținute prin încercări la temperatura de -180°C [81] atestă o scădere a lui σ_{rdS} pentru orice valoare a ariei defectului $A_d \neq 0$, [I].

- În situația în care discontinuități plane sunt prezente în piese supuse la solicitări variabile, o primă posibilitate de calcul are la bază relația lui Paris, [116], [117], exprimată sub forma:

$$\frac{da}{dN} = B (\Delta K)^m \quad (11)$$

în care B și m sunt constante de material și de condiții de aplicare a solicitării. Se pune în evidență faptul că extinderea discontinuității în speță a fisurii, de mărime a poate avea loc numai dacă amplitudinea factorului de intensitate a tensiunii întrece un anumit prag sau o valoare critică:

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} > \Delta K_0 \quad (12)$$

Valorile constantelor B , m și ΔK_0 pot fi determinate experimental, sau adoptate din datele cunoscute din literatură. După [21], la oțelurile nealiate și slab aliate pentru construcții se recomandă adoptarea, în funcție de limita de curgere σ_c sau rezistența la rupere σ_r , exprimate în daN/mm^2 a valorilor reieșite prin înlocuire în relațiile:

$$m = 4,52 - 0,026 \cdot \sigma_c$$

sau

$$m = 5,19 - 0,0297 \cdot \sigma_r \quad (13)$$

respectiv relațiile:

$$\log B = 0,0483 \cdot \sigma_c - 12,432$$

$$\log B = 0,0556 \cdot \sigma_r - 13,726 \quad (14)$$

Pe baza datelor din [159] se recomandă $m = 4$, $B = 7,4 \cdot 10^{-16}$. În ce privește amplitudinea critică, de prag, a factorului de intensitate a tensiunii ΔK_c , ce poate fi calculată, în funcție de gradul de asimetrie a ciclului de solicitare, $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$, din relația:

$$\Delta K_0 = 190 - 144R \quad \left[\text{N} \cdot \text{mm}^{-3/2} \right] \quad (15)$$

sau în funcție de limita de curgere și mărimea **a**, folosind relația:

$$\Delta K_0 = \frac{46}{1 - \frac{144}{\sigma_c \cdot a^{3/2}}} \quad \left[\text{MPa} \cdot \text{mm}^{-3/2} \right] \quad (16)$$

Presupunând cunoscută mărimea efectivă sau echivalentă a discontinuității **a**, din σ_{\max} și σ_{\min} corespunzător spectrului de solicitare, se determină $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$.

Se repetă calculul pentru un increment al discontinuității $a + \Delta a$, stabilindu-se numărul de cicluri $N_{\Delta a}$ necesar pentru extinderea cu Δa a discontinuității **a**. Calculul se repetă pentru un increment $a + 2\Delta a$, determinându-se $N_{2\Delta a}$, și în continuare până se ajunge la limita admisă a mărimii defectului a_c .

Rezultatul acestui calcul se interpretează astfel: dacă $\sum_{i=1}^n N_{i\Delta a} > N_n$, unde N_n este numărul

de cicluri sau durabilitatea necesară, operațională pentru funcționarea produsului respectiv, înseamnă că defectul de mărime **a** nu poate atinge limita critică a_c înainte de epuizarea numărului de solicitări corespunzătoare întregii perioade de funcționare a produsului și ca atare defectul de mărime **a** poate fi acceptat.

Algoritmul de calcul al propagării fisurii pe baza conceptelor de Mecanica ruperii în condițiile solicitării ciclice, precum și modalitățile de evaluare a rezultatului în vederea luării unor decizii pertinente privitor la funcționarea piesei este prezentat în figura 7.

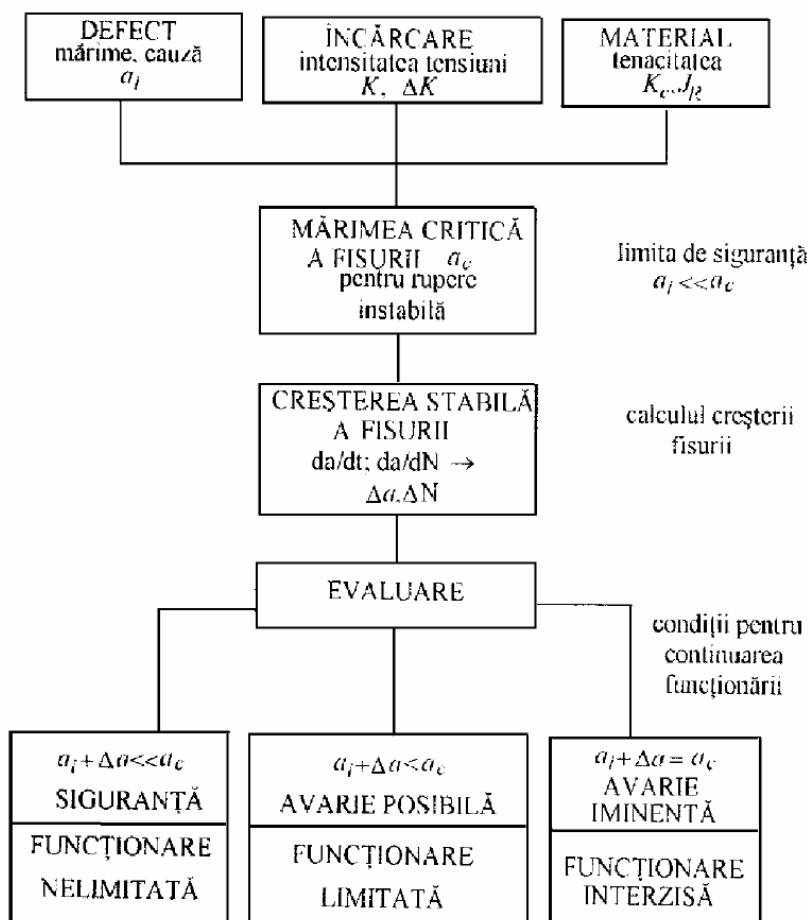


Fig. 7 Schema de evaluare a influenței defectelor plane la piese supuse solicitărilor variabile

3.3. Concentrarea tensiunii în zona imperfecțiunilor de formă și suprafață

3.3.1. Coeficientul teoretic de concentrare a tensiunii

Studierea câmpurilor de tensiuni mecanice în diferite corpuri a format și formează obiectul numeroaselor preocupări din cele mai varii domenii ingineresti și chiar medicină. Zona specială de interes este ocupată de procesul de perturbare - redistribuire a acestor câmpuri în urma unor modificări de formă și de continuitate a mediului, care conduce inclusiv la concentrarea locală a tensiunilor. În acest mod limitele critice de comportare a materialului pot fi atinse, fie mai devreme, fie chiar necontrolat, promovând mecanisme specifice de degradare.

Pentru a ilustra importanța teoretică și practică a cercetărilor este suficient să se menționeze că destul de recent, din erori de evaluare a imperfecțiunilor de continuitate la îmbinări de materiale în construcția unor rachete purtătoare de tip Atlas, s-a ajuns la distrugerea lor încă de pe rampa de lansare. Pe de altă parte, prin subevaluarea concentratorilor de tensiuni, s-a produs fisurarea accelerată prin proces de oboseală a unor elemente de fuzelaj de la câteva tipuri de avioane Boeing. Cronologic, alături de abordarea analitică a concentrării tensiunilor, limitată în general la starea de comportare elastică și elasto-plastică a materialelor, s-au dezvoltat și metodele de investigare experimentală, folosindu-se în special modelarea fotoelastică, interferometria și tensometria electrică.

Modelul concentratorului de tensiune considerat în dezvoltarea teoriei concentrării tensiunii de către Neuber l-a constituit forma (inelară) hiperbolică prezentată în figura 8. Rezultatul esențial al analizei distribuției componentelor tensiunii longitudinale σ_l , tangențiale σ_t , și radiale σ_r , este exprimat prin relațiile:

$$\frac{\sigma_l}{\sigma_n} = \frac{\sigma_t}{\sigma_n} = \frac{1}{N} \left\{ \frac{a}{\rho} \left(\frac{a}{\rho} + 1 \right)^{1/2} + (0,5 + \mu) \frac{a}{\rho} + (1 + \mu) \left[\left(\frac{a}{\rho} + 1 \right)^{1/2} + 1 \right] \right\} \quad (17)$$

$$\frac{\sigma_r}{\sigma_n} = \frac{\sigma_t}{\sigma_n} = \frac{1}{N} \cdot \frac{a}{\rho} \left[\mu \left(\frac{a}{\rho} + 1 \right) + 0,5 \right] \quad (18)$$

în care:

$$N = \frac{a}{\rho} + 2\mu \left(\frac{a}{\rho} + 1 \right)^{1/2} + 2 \quad (19)$$

iar

$$\sigma_n = \frac{F}{A_k} \quad (20)$$

F - fiind forța de întindere axială aplicată piesei din figura 8, iar A_u - secțiunea minimă din planul de simetrie a concentratorului. În esență se ajunge la concluzia că rapoartele σ_t/σ_n , respectiv σ_t/σ_n , depind esențial de factorii geometrici a și ρ .

Dependența acestor rapoarte de criteriul adimensional a/ρ , pentru diferite valori ale coeficientului Poisson μ este ilustrată în figura 9. Cu valoarea maximă a componentei σ_c , se definește coeficientul teoretic de concentrare a tensiunii α_k :

$$\alpha_k = K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} = f\left(\frac{a}{\rho}\right) \quad (21)$$

Analiza prin metoda elementelor finite, dezvoltată în ultimele trei-patru decenii, ca urmare a facilităților oferite de calculatoare și a creșterii performanțelor acestora în timp, oferă largi posibilități de obținere a unor rezultate cantitative și calitative în investigarea de structuri complexe bi - și tridimensionale. Folosind un sistem informatic performant și modalitatea de discretizare triunghiulară, adecvate gradientilor mari de câmp, s-a reușit să se asigure o convergență superioară a rezultatului implicit, cu o precizie numerică suficientă pentru evaluarea zonei singularităților, respectiv a vârfurilor de tensiune.

Confruntarea rezultatelor analizei FEM cu cele analitice obținute prin aplicarea relațiilor lui Neuber în variantă elastică sau elasto-plastică, a permis totodată evidențierea unor diferențieri semnificative, în special în cazul discontinuităților de tip fisură.

În cazul îmbinărilor sudate din aliaje similare de structură feritică, respectiv austenitică, s-a demonstrat existența unor concentrări de tensiune de natură exclusiv metalurgică, [133].

3.3.2. Particularitățile aplicării FEM la analiza câmpului de tensiuni în îmbinări sudate.

Îmbinarea sudată poate fi definită ca loc geometric de suprapunere a unor câmpuri mecanice și termice eterogene, de variație și dependență complexă, cu consecințe asupra transformărilor structurale și asupra comportării la sollicitări mecanice.

Gradientii câmpului de tensiuni mecanice, exprimați prin valoarea coeficientului teoretic de concentrare a tensiunii sunt influențați de următorii factori:

- forma îmbinării sudate;
- felul sollicitării;
- impreciziile geometrice - abaterile de formă;
- tipul, natura, mărimea și localizarea discontinuităților;
- constantele elastice ale materialului.

Primii trei factori sunt luați în considerație prin varietatea tipologică investigată atât ca formă, cât și ca schemă de sollicitare. Reprezentativ pentru al patrulea factor se consideră analiza câmpului de tensiuni din jurul discontinuității volumice sferice, respectiv plane, simulând forma unei fisuri ($a \gg b$) localizate la rădăcina îmbinării, zonă de suprapunere a singularităților de formă și discontinuitate, orientate în cazul fisurii într-un plan la 45° în secțiunea transversală a îmbinării de colț.

Modelarea matriceală folosește ipoteza corpului rigido-elastic, permițând stabilirea unei relații directe între coeficientul de concentrare a tensiunii, α_k , și tenacitatea critică la vârful fisurii, K_{Ic} , de forma:

$$K_{Ic} = \frac{1}{2} \lim_{\rho \rightarrow 0} \alpha_k \cdot \sigma \sqrt{\pi \rho} \quad (22)$$

unde, raza de curbură la vârful fisurii $\rho \ll a$, a fiind anvergura fisurii, iar σ nivelul de solicitare nominală. Ca urmare, limitările în aplicarea metodei trebuie considerate, cu atât mai strict cu cât nivelul de solicitare se apropie mai mult de limita σ^* ($\sigma^* = \sigma_c / \alpha_k$), unde σ_c este limita de curgere, cu cât prin caracteristici materialul se comportă mai aproape de modelul rigido-plastic, cu sau fără ecrusare și cu cât zona influențată termic este mai extinsă și cuprinde volumetric mai multe faze și constituenți ductili. În cazul materialelor ductile, la aceste restricții se adaugă și faptul că, pe măsura modificării energiei de deformare W , din jurul concentratorilor $W = f(\alpha_k)$ are loc și o modificare a limitei de curgere, ceea ce induce un efect suplimentar de eterogenitate mecanică.

- Forme topologice de îmbinări sudate. S-au luat în considerație cele două tipuri principale de îmbinări sudate de rezistentă: îmbinările cap la cap și îmbinările de colț.

Cum îmbinarea de colț oferă o multitudine de soluții constructive, funcție de dimensiunile și forma componentelor îmbinate, investigațiile s-au referit la următoarele tipuri:

- a) îmbinarea de colț bilaterală simetrică nepătrunsă solicitată la tracțiune și forfecare;
- b) îmbinarea de colț unilaterală nepătrunsă solicitată la tracțiune și încovoiere;
- c) îmbinarea de colț bilaterală simetrică complet pătrunsă cunoscută și sub denumirea "cu rostul în K" solicitată la tracțiune și forfecare;
- d) îmbinarea de colț prin suprapunere frontală, bilaterală solicitată la tracțiune și forfecare;
- e) îmbinarea de colț prin suprapunere frontală unilaterală solicitată la tracțiune, forfecare și încovoiere.

Ca parametru geometric de influență s-a considerat supraînălțarea și subțierea la îmbinarea cap la cap, respectiv concavitatea și convexitatea în cazul îmbinărilor de colț.

În vederea extinderii analizei, intervalele de variație au depășit limitele admise în scopul de a se obține o mai bună definire și ajustare a unor corelații statistice, funcție de valoarea coeficientului teoretic de concentrare a tensiunilor.

3.3.3. Analiza FEM a îmbinării sudate de colț nepătrunsă în L și T

S-a considerat cel mai defavorabil tip de îmbinare sudată: îmbinarea sudată de colț nepătrunsă, solicitată în secțiune de forță tăietoare F . Geometria acestei îmbinări este prezentată în figura 10.

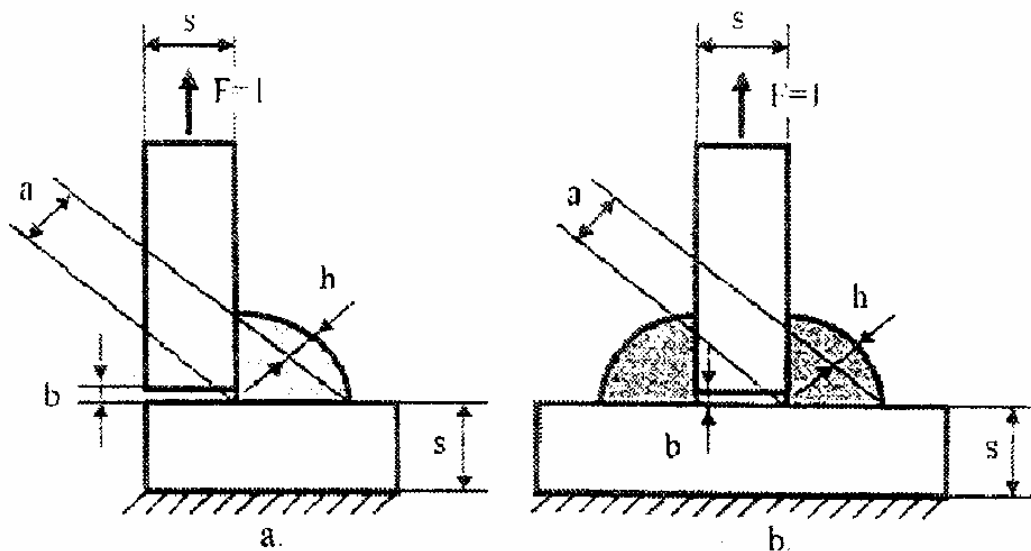


Fig. 10. Definirea factorilor geometrici la îmbinări de colț: a) în L; b) în T

La modelarea îmbinării s-au admis următoarele ipoteze:

- forța este unitară ($F = 1$);
- talpa îmbinării este încastrată;
- grosimea componentelor (s) este egală;
- deschiderea rostului este o zecime din grosimea componentelor ($b = s/10$);
- grosimea sudurii (a) ia valori între $s/2$ și s ;
- supraînălțarea (h) ia valori între $-a/3$ și $+a/3$.

În figura 11 se prezintă modul de localizare a concentratorilor de tensiune în îmbinările sudate de colț, în funcție de supraînălțarea cusăturii, pentru o grosime a sudurii $a = 0,707s$.

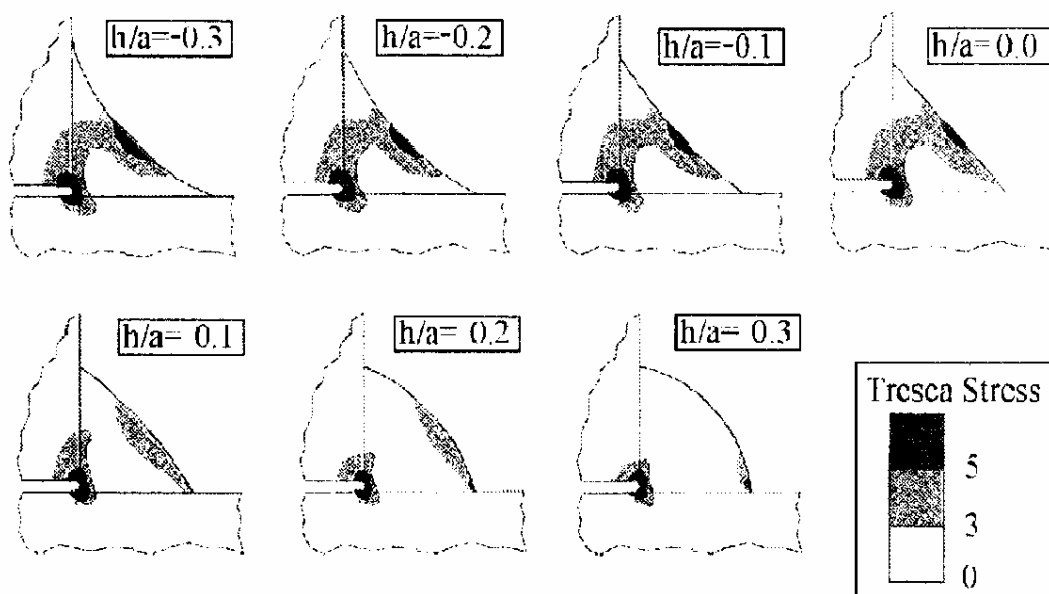


Fig. 11 Localizarea vârfurilor de tensiune în îmbinări de colț în L, la diferite valori h/a

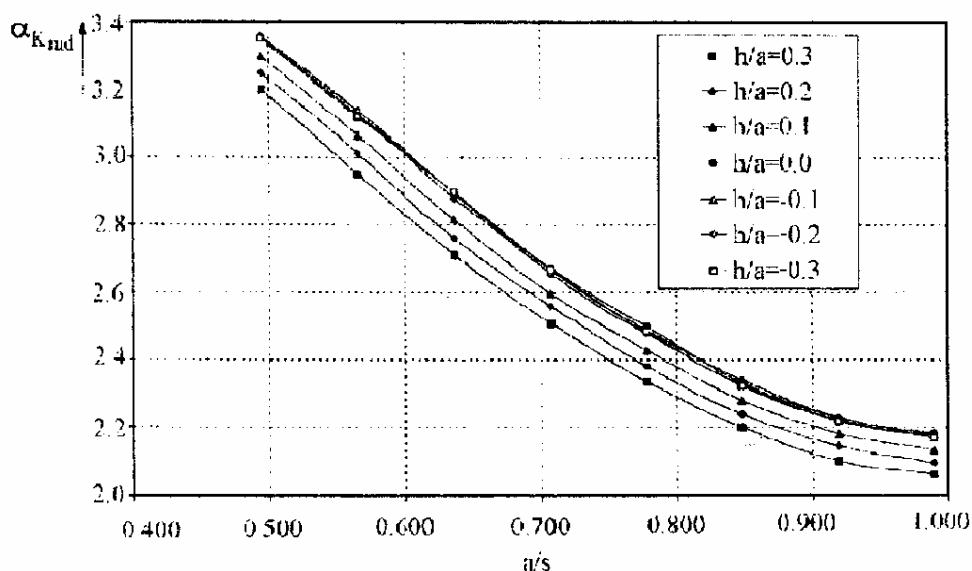


Fig. 12. Variația coeficientului teoretic de concentrare a tensiunii la rădăcina cusăturii funcție de raportul a/s

Se observă că, pe câtă vreme la sudurile concave cu $h/a = -0,3 \div 0$, vârfurile de tensiune se situează în planul bisector al îmbinării la rădăcină și la suprafață, la îmbinările convexe $h/a = 0,1 \div 0,3$, vârfurile de tensiune se deplasează în planul de legătură al piesei îmbinate cu localizarea la rădăcină și la piciorul sudurii.

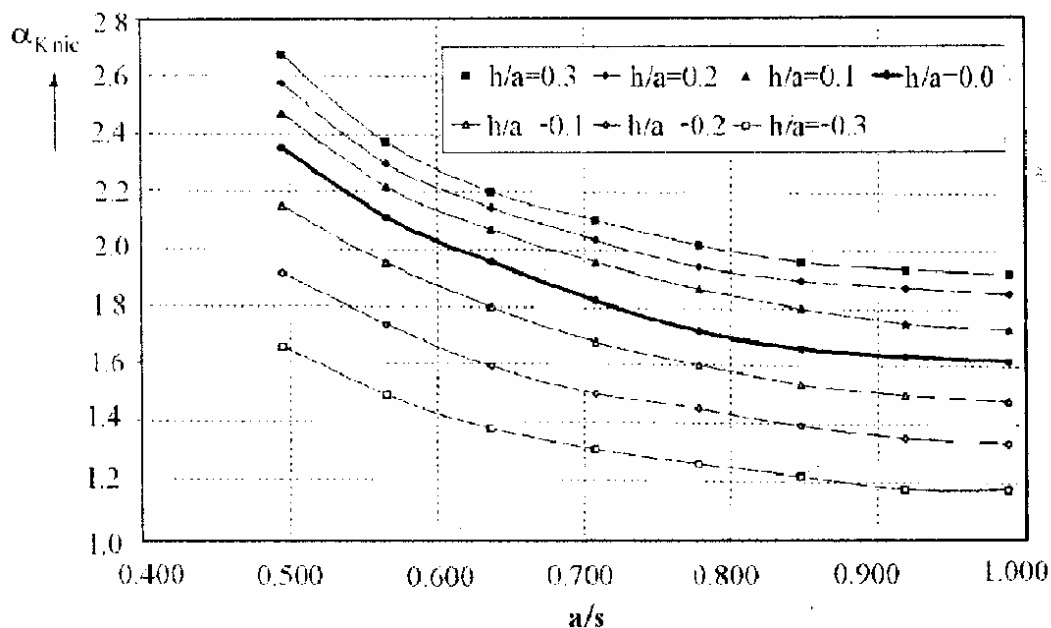


Fig. 13 Variația coeficientului teoretic de concentrare a tensiunii la piciorul cusăturii, funcție de a/s și h/a

În figura 12 se prezintă variația coeficientului de concentrare a tensiunii la rădăcina îmbinării sudate α_{Krad} , în funcție de a/s și h/a . Ca și în cazul îmbinărilor sudate de colț unilaterale, rezultatele arată că asupra coeficientului de concentrare a tensiunii la rădăcina cusăturii α_{Krad} , nu are influență directă decât grosimea efectivă a cusăturii.

În figura 13 se prezintă valoarea coeficientului de concentrare a tensiunii la piciorul îmbinării sudate α_{Kpic} , în funcție de a/s și h/a . Prin analiză de regresie nelineară s-a găsit dependența prezentată în ecuația:

$$\alpha_{Kpicior} = \frac{1,14(\pm 0,005) \cdot \left[1,38(\pm 0,01) + (h/a_{ef}) - (h/a_{ef})^2 \right]}{\sqrt{a_{ef}/s}} \quad (23)$$

Factorul de intensitate a corelației R^2 este 0,9896, ceea ce indică o corelație de tip determinist între cele două variabile.

3.3.4. Analiza FEM a îmbinării de colț cu eclise bilaterale

Îmbinarea sudată de colț cu eclise bilaterale solicitată în planul longitudinal al acesteia de către o forță de întindere unitară este prezentată în figura 14. Ca urmare a simetriei în plan transversal, cusătura este solicitată la întindere și forfecare. S-au considerat cinci geometrii diferite ale îmbinării sudate:

- sudură cu suprafața mult concavă, cu supraînălțare negativă de 1/4 din grosimea sudurii ($h/a = -0,25$);
- sudură cu suprafața puțin concavă, cu supraînălțare negativă de cea. 1/8 din grosimea sudurii ($h/a = -0,12$);
- sudură cu suprafața dreaptă, cu supraînălțare nulă ($h/a = 0,00$);
- sudură cu suprafața puțin convexă, cu supraînălțare pozitivă de cea. 1/8 din grosimea sudurii ($h/a = 0,12$);
- sudură cu suprafața mult convexă, cu supraînălțare pozitivă de 1/4 din grosimea sudurii ($h/a = 0,25$).

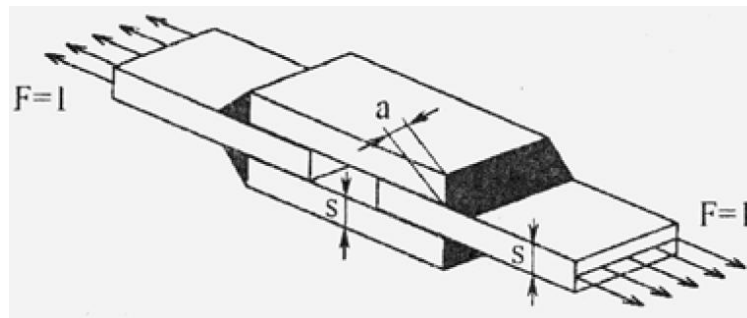


Fig. 14. Modelul îmbinării de colț cu eclise bilaterale

Așa cum se poate observa din figura 15, localizarea vârfului de tensiune de la rădăcina sudurii este specifică tuturor îmbinărilor de colț. Indiferent de geometria acestora și în funcție de geometria cordonului de sudură, se disting două zone de concentrări de tensiune pe suprafața sudurii:

- la piciorul sudurii ($\theta = 90^\circ$), pentru îmbinări convexe și puțin concave;
- la suprafață, corespunzător intersecției cu planul 0, la valori cuprinse între 60° și 70° pentru îmbinări concave.

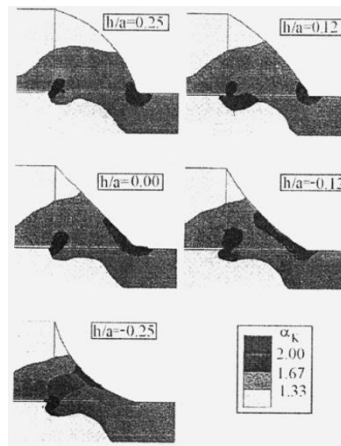


Fig. 15. Distribuția tensiunilor în îmbinarea de colț cu eclise bilaterale solicitată la tracțiune și forfecare

Analizând distribuția tensiunilor la suprafața îmbinării (figura 16), se pot distinge pe suprafața $\alpha_{Ksupr}=f(\theta, h/a)$, marcată de cele cinci curbe, două puncte de singularitate, pentru $\theta = 10^\circ$ și pentru $\theta = 83^\circ$. La valorile considerate ale supraînălțării, cele cinci curbe se intersectează toate în același punct, ceea ce duce la concluzia ca indiferent de supraînălțare, valoarea coeficientului de concentrare a tensiunii este identic.

3.3.5. Coeficientul efectiv de concentrare a tensiunii

Coeficientul efectiv de concentrare se stabilește pe baza efectelor pe care le cauzează vârfurile de tensiuni asupra comportării materialelor. El se definește prin raportarea unei stări limită dintr-un material (piesă) omogen, neafectat de variații geometrice și unul afectat de exemplu, rezistența la rupere sau limita de curgere în cazul solicitării statice, respectiv rezistența la oboseală în cazul solicitării variabile:

$$k_\sigma = \frac{\sigma_r}{\sigma_{rk}}$$

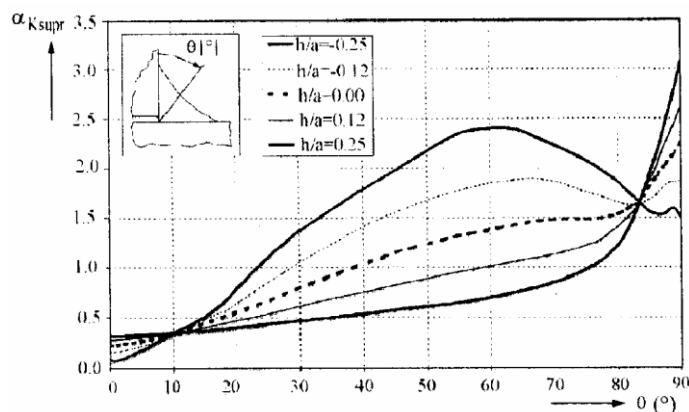


Fig. 16. Variația coeficientului teoretic de concentrare a tensiunii la suprafața îmbinării sudate cu eclise bilaterale, în funcție de unghiul θ .

În funcție de caracteristicile de tenacitate ale materialului $k_\sigma > 1$ la materiale cu o comportare fragilă, respectiv $k_\sigma \leq 1$ la materiale cu o comportare ductilă.

Pe baza cercetărilor experimentale este posibilă determinarea corelației dintre coeficientul teoretic de concentrare și coeficientul efectiv de concentrare. O astfel de corelație pentru oțeluri nealiat și slab aliate folosite în construcții metalice a fost stabilită în [133] sub forma simplă:

$$k_{\sigma} = \frac{1}{2,1 - \frac{1,1}{\alpha_k}} \quad (25)$$

Pe baza relației $k_{\sigma} = f(\alpha_k)$ rezultatele cercetărilor cu element finit pot furniza date concrete de calcul, inclusiv pentru evaluări cantitative ale influenței factorilor geometrici.

4. NIVELE DE ADMISIBILITATE A DISCONTINUITĂȚILOR

4.1. Parametri de caracterizare a discontinuităților la îmbinări sudate prin topire

În vederea aprecierii calității îmbinărilor sudate s-au elaborat un număr mare de norme și standarde pentru diferite categorii de produse, ca de exemplu: vase sub presiune, conducte, construcții metalice, nave, vehicule feroviare și rutiere, tehnici de zbor, instalații energetice etc. Pentru alte tipuri de structuri sudate, criteriile de calitate și de admisibilitate a defectelor se impun prin caiete de sarcini sau prin norme tehnice. Rezultă că din acest punct de vedere nu s-a ajuns în stadiul unor reglementări unitare, valabile pentru orice tip de sudură sau orice produs. Pe de altă parte criteriile de admisibilitate a defectelor sunt riguros condiționate de metoda și volumul de control aplicat.

Indiferent de criteriul de apreciere sau metoda de control, considerațiile asupra calității îmbinării sudate se concentrează pe zone de lungime L , limitate convențional la 100 mm în cazul îmbinării pieselor cu grosimi de până la 10 mm, la $L = 10s$ în cazul pieselor cu grosimi $10 < s \leq 30$ mm respectiv, la 300 mm în cazul pieselor cu grosimi $s > 30$ mm. La îmbinările mai scurte, lungimea de referință se consideră lungimea îmbinării.

Clasele de calitate ale îmbinărilor portante din oțel [168], respectiv din aluminiu și aliajele acestuia [182], sudate prin topire, sunt definite pe baza următorilor parametri aplicați unui număr de 25 tipuri de imperfecțiuni:

- dimensiunea maximă absolută (d);
- dimensiunea relativă maximă, obținută prin raportarea lui (d) la adâncimea de pătrundere a îmbinării sudate cap la cap (s), respectiv la grosimea îmbinării de colt (a);
- raportul dintre aria maximă ocupată de discontinuități și suprafața îmbinării cuprinsă în radiografie sau în secțiunea de rupere, în cazul discontinuităților volumice, respectiv:
- adâncimea sau lățimea (h), respectiv lungimea (l) maximă, în cazul discontinuităților plane și a celor asimilate lor, de exemplu creștătura, și/sau mărimea denivelării (h), respectiv raportul dintre h și grosimea elementului sudat, în cazul imperfecțiunilor de formă și de suprafață.

Parametri enumerați sunt aleși pentru a caracteriza cât mai facil gradul de nocivitate a discontinuităților - defectelor, atât în ce privește rezistența la rupere statică a îmbinării

sudate, cât mai ales în ce privește tenacitatea la rupere de care se folosesc calculele de fiabilitate.

Sintetizând în esență rezultatele cercetărilor asupra influenței defectelor la îmbinări sudate din oțel, se concluzionează faptul că în cazul discontinuităților volumice sau tridimensionale, influența asupra caracteristicilor mecanice de rezistentă și de tenacitate se manifestă în principal prin micșorarea secțiunii utile, în special la materialele ductile, iar în cazul discontinuităților plane și a celor cu o comportare similară, influența se manifestă prin efect de concentrare exprimat prin factorul de intensitate a tensiunii K_I .

În insuficientă măsură se regăsesc în departajarea claselor de calitate alte criterii la fel de importante cum sunt: poziția discontinuității în secțiune în corelație cu semnul tensiunii +/- sau cu modul de solicitare (static, variabil), gradul de asimetrie a spectrului de solicitare, nivelul tensiunilor remanente, prezența mediilor chimic active, posibilitatea interacționării mediului cu solicitarea mecanică, ca în cazul manifestării fenomenului de coroziune tenso-fisurantă etc.

Definirea nivelelor de admisibilitate a discontinuităților pe clase de calitate reprezintă problema cea mai sensibilă și totodată cea mai susceptibilă interpretării.

Îndepărtarea de stările critice ale factorului de intensitate a tensiunii K_I prin coeficienți de siguranță supradimensionați în special vis a vis de dimensiunile admise discontinuităților plane definite pe baza mecanicii ruperii linear-elastice [21], respectiv considerarea discontinuităților volumice în aceeași clasă de nocivitate cu cele plane pentru a li se aplica aceleași metode de calcul, deplasează centrul de greutate al problemicii spre metodele de examinare nedistructivă.

4.2. Nivele de admisibilitate a discontinuităților la îmbinări sudate prin topire

După [168] și [182] se stabilesc trei niveluri de acceptare a discontinuităților în îmbinările sudate prin topire, la oțeluri și la aluminiu și aliajele lor: nivelul D, considerat un nivel moderat ca severitate (calitate), nivelul C, considerat de mijloc și nivelul B, considerat sever. În tabelul 4 sunt prezentate după [172] limitele de admisibilitate pe clase de calitate a tipurilor de discontinuități, care pot fi evaluate cu metode CND, în cazul îmbinărilor sudate prin topire ale oțelurilor cu grosimi cuprinse între 3 și 63 mm.

Tabelul 4

Denumirea imperfecțiunii	Simbol	Criterii	Limite ale imperfecțiunilor pe clase de calitate		
			B	C	D
SUFLURI PORI	2011 2012	Suprafața maximă în secțiunea ariei de rezistență	1%	2%	4%
	2014	Dimens. max. relativă a unui por singular la suduri cap la cap	$d \leq 0,3s$	$d \leq 0,4s$	$d \leq 0,5s$
	2017	Dimens. max. relativă a unui por singular la suduri de colț	$d \leq 0,3a$	$d \leq 0,4a$	$d \leq 0,5a$
		Dimens. max. absolută a unui por izolat	3 mm	4 mm	5 mm
SUFLURI PORI GRUPAȚI	2013	Suprafața maximă în secțiunea ariei de rezistență	4%	8%	16%
	2017	Dimensiunea maximă absolută a grupului de sufluri, pori	2 mm	3 mm	4 mm
INCLUZIUNI SOLIDE	300	Lungimea imperfecțiunii	neadmis	neadmis	$h \leq 0,5s$ $h \leq 0,5a$
		Dimensiunea maximă relativă	$h \leq 0,3s$ $h \leq 0,3a$	$h \leq 0,4s$ $h \leq 0,4a$	$h \leq 0,5s$ $h \leq 0,5a$
		Dimensiunea maximă absolută	2 mm	3 mm	4 mm
LIPSĂ DE TOPIRE	401 4011 4012 4013		neadmis	neadmis	Intermitent fără să ajungă la suprafață
LIPSĂ DE PĂTRUN- DERE	402	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	neadmis	$h \leq 0,1s$ max 1,5 mm	$h < 0,2s$ max 2 mm
CRESTĂTURI MARGINALE	5011 5012	Adâncimea	$h \leq 0,5$ mm	$h \leq 1,0$ mm	$h \leq 1,5$ mm
EXCES DE PĂTRUN- DERE	504	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	$h \leq 1$ mm + 0,3b max 3 mm	$h \leq 1$ mm + 0,6b max 4 mm	$h \leq 1$ mm + 1,2b max 5 mm
RETASURĂ	515		$h \leq 0,5$ mm	$h \leq 1$ mm	$h \leq 1,5$ mm
SUBȚIERE	511 509	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	$h \leq 0,05t$ max 0,5 mm	$h \leq 0,1t$ max 1 mm	$h \leq 0,2t$ max 2 mm
DEZAXARE	507	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	$h \leq 0,5t$ max 2 mm	$h \leq 0,5t$ max 3 mm	$h \leq 0,5t$ max 4 mm
IMPERFEC- ȚIUNI MULTIPLE		$s \geq 10$ mm $a \geq 10$ mm	$\Sigma h \leq 0,15s$ $\Sigma h \leq 0,15a$ max 10 mm	$\Sigma h \leq 0,2s$ $\Sigma h \leq 0,2a$ max 10 mm	$\Sigma h \leq 0,25s$ $\Sigma h \leq 0,25a$ max 10 mm
FISURI	100	$h.l > 1$ mm ² limita microfisurii	neadmise		
FISURI DE CRATER	104		neadmise		admise

În vederea interpretării corecte a criteriilor cuprinse în tabelul 4 cu privire la nivelele de admisibilitate a imperfecțiunilor pe clase de calitate s-a elaborat catalogul radiografiilor de referință [161]. Acesta conține un număr de 67 radiografii reprezentative, atât ca forme și grosimi ale îmbinărilor sudate, cât și ca tipuri de discontinuități și nivele de admisibilitate. Determinându-se tabelar numărul radiografiei de referință pentru situația punctuală de

interes, se obține de fapt etalonul de comparație pentru interpretarea radiografiilor rezultate în urma controlului. În situații limită de diagnosticare devine utilă analizarea unor radiografii de referință de la o clasă de calitate superioară sau inferioară celei date.

O comparație între nivelele de admisibilitate a discontinuităților după standardul european EN 25817 și alte norme americane pentru recipiente sub presiune [160], pentru poduri și conducte [155], și norme poloneze pentru tubulatură sub presiune, [180], poate fi realizată cu ajutorul tabelului 5 pe baza datelor sintetizate în [25]:

Tabelul 5

Tipul discontinuității	Prevederi pe clase după [168]			Norma [160] la grosimi		Norma [155] (mm)	Norma [180] la grosimi	
	B (mm)	C (mm)	D (mm)	10 mm (mm)	30 mm (mm)		10 mm (mm)	30 mm (mm)
Sufluri, pori	3	4	5	2,5	5,0	2,4	2,0	4,0
Incluziuni zgură	2	3	4	2,5	5,0	neadmise	2,5	5,0
Retasură la rădăcină	0,5	1	1,5	1,0	1,0	neadmisă	1,0	1,0
Crestături	0,5	1	1,5	0,5	0,5	0,25	1,0	1,0
Incluziuni nemetalice	-	-	-	-	-	-	-	-
Microfisuri la cald	< 1 mm ²	< 1 mm ²	< 1 mm ²	-	-	-	-	-

După [35] și [159], limitele discontinuităților volumice admise în clase de calitate, la solicitări variabile [129], corespunzând unei probabilități de nerupere de 97,5%, sunt indicate în tabelul 6.

Valorile înscrise pe coloana *nedetensionat* se referă la îmbinări sudate ale oțelurilor nealiat sau slab aliate cu mangan netratate termic după sudare, precum și ale aliajelor de aluminiu, iar valorile înscrise în coloana *detensionat*, la îmbinări sudate ale categoriilor de oțeluri detensionate în urma sudării.

Tabelul 7, [182], cuprinde limitele de acceptare a imperfecțiunilor tipice îmbinărilor sudate prin topire, la aluminiu și aliajele sudabile ale aluminiului.

Calitatea execuției într-un domeniu larg al construcțiilor sudate este riguros definită de către normele AWS [155], atât în faza de fabricație, cât și în faza inspecției de verificare în cursul exploatării. Controlul se efectuează după ce îmbinarea s-a răcit la temperatura ambiantă. După [155], la unele oțeluri condițiile de începere a controlului sunt mai restrictive, acceptându-se numai după 48 ore de la răcirea îmbinării.

Tabelul 6

Clasa de calitate [35], [69]	Tip defect			
	Sufluri, incluziuni A_d/A_0 (%) în aria unei radiografii		Incluziuni alungite l_{max} cu probabilitate 97,5% (mm)	
	Nedetensionat	Detensionat	Nedetensionat	Detensionat
0	0	0	1,5	7,5
1	3	3	2,5	19,0
2	3	3	4	58,0
3	5	5	10	nelimitat
4	5	5	35	nelimitat
5	5	5	nelimitat	nelimitat
6 – 10	5	5	nelimitat	nelimitat

Condițiile de admisibilitate a imperfecțiunilor sunt prescrise pe procedee de control, tipuri de produse și mod de solicitare mecanică. Ca tipuri de produse și mod de solicitare vin în considerație produse care nu fac parte din categoria tuburilor și țevelor solicitate fie static, fie ciclic și produse din categoria tuburilor sau țevelor solicitate static și/sau variabil.

Criterii de admisibilitate a imperfecțiunilor la controlul cu lichide penetrante și cu pulberi magnetice, după AWS.

Sunt admise următoarele tipuri de imperfecțiuni: sufluri, pori, incluziuni, retasuri sub denumirea de porozități, și creștături. Condițiile de admisibilitate sunt descrise în tabelul 8, în care sunt notate cu x, cazurile de valabilitate.

Criterii de admisibilitate a imperfecțiunilor la controlul radiografic, după AWS Se referă la discontinuități, altele decât fisuri, deosebindu-se discontinuități alungite și discontinuități rotunde. Se consideră discontinuități alungite cele a căror lungime depășește de trei ori lățimea.

Elemente netubulare solicitate static

Discontinuitățile detectate radiografic nu sunt admise dacă depășesc următoarele limite:

- a. Discontinuități alungite a căror dimensiune maximă depășește valoarea de $2/3s$, s fiind grosimea piesei (mm).
- b. Discontinuități apropiate (grupate), dacă distanța minimă dintre două discontinuități succesive sau dintre o discontinuitate și capăt, respectiv marginea unei îmbinări intersectate se situează sub $2s$.
- c. Discontinuități rotunde mai mari de $s/3$, respectiv de 6 mm. Dacă grosimea $s > 50$ mm, indicația maximă poate fi de 10 mm. Distanța minimă dintre două discontinuități este de 2 mm, iar distanța minimă dintre o discontinuitate și capăt, respectiv marginea unei îmbinări intersectate trebuie să fie de 3 ori dimensiunea celei mai mari discontinuități acceptate.

Tabelul

7

Nr ert	Denumirea imperfec- țiunii	Nr. de referință ISO 6520	Observații	Limitele imperfecțiunilor pentru nivelurile de acceptare		
				Moderat D	Intermediar C	Sever B
1	Fisuri	100	Toate tipurile de fisuri cu excepția microfisurilor ($h \leq 1 \text{ mm}^3$), fisuri în crater, a se vedea nr. 2	Nu se admit		
2	Fisură în crater	104		$h \leq 0,2s$ sau $0,2a$	Nu se admit	
3	Suflură	201	Termenul "suflură" include: porozitate, cuib de sufluri și pori	Pentru 100 mm lungime		
4	Por	2011	Aria totală a suflurilor dintr-un grup se calculează însumând: aria circumscrisă tuturor suflurilor sau aria cercului cu diametrul egal cu grosimea sudurii.	$A \leq 8s$ sau $8a \text{ mm}^2$	$A \leq 4s$ sau $4a \text{ mm}^2$	$A \leq 2s$ sau $2a \text{ mm}^2$
				$d \leq 0,5s$ sau $0,5a$ max. 5,5 mm	$d \leq 0,3s$ sau $0,25a$ max. 4,5 mm	$d \leq 0,25s$ sau $0,25a$ max. 3,5 mm
5	Porozitate	2012	Aria suprafeței poroase admisă trebuie să fie locală. Se ia în considerație posibilitatea existenței unor defecte ascunse	$d \leq 0,5\text{mm} + 0,035s$ sau $0,035a$ max. 2 mm	$d \leq 0,5\text{mm} + 0,02s$ sau $0,02a$ max. 1,5 mm	$d \leq 0,5\text{mm} + 0,01s$ sau $0,01a$ max. 1 mm
6	Cuib de sufluri	2013		$d \leq 0,5\text{mm} + 0,05s$ sau $0,05a$ max. 3 mm	$d \leq 0,5\text{mm} + 0,035s$ sau $0,035a$ max. 2 mm	$d \leq 0,5\text{mm} + 0,02s$ sau $0,02a$ max. 1,5 mm
7	Por de suprafață	2017		Pentru 100 mm lungime		
				$A \leq 2 s \text{ mm}^2$ $d \leq 0,5\text{mm} + 0,035s$ sau $0,035a$ max. 2 mm	$A \leq 1 s \text{ mm}^2$ $d \leq 0,5\text{mm} + 0,02s$ sau $0,02a$ max. 1,5 mm	$A \leq 0,5 s \text{ mm}^2$ $d \leq 0,5\text{mm} + 0,01s$ sau $0,01a$ max. 1 mm
8	Incluziune solidă (exceptând cele de cupru și wolfram)	300	Incluziunile solide cuprind și incluziunile de oxizi. Dacă într-o secțiune transversală există mai multe incluziuni $h_1, h_2, h_3 \dots$ suma lor este: $\Sigma h = h_1 + h_2 + h_3 \dots$	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
				Imperfecțiuni scurte:		
				$\Sigma h \leq 0,1 s$ sau $0,1 a$		Nu se admit
				max. 3 mm	max. 1,5 mm	
9	Incluziune de wolfram	3011		$h \leq 0,1 s$ sau $0,1 a$		$h \leq 0,05s$ sau $0,05a$ max. 0,8 mm
				max. 3 mm	max. 1,5 mm	
10	Incluziune de cupru	3042		Nu se admit		

11	Lipsă de topire (topire incompletă)	401	Dacă într-o secțiune transversală există mai multe imperfecțiuni de același tip $h_1, h_2, h_3 \dots$ suma lor este: $\Sigma h = h_1 + h_2 + h_3 \dots$	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
				Imperfecțiuni scurte:		
				$\Sigma h \leq 0,1 s$ sau $0,1 a$		
				max. 3 mm	max. 1,5 mm	Nu se admit
12	Lipsă de pătrundere (pătrundere incompletă)	402	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Se admit puține dar nu în mod sistematic		Nu se admit
				$h \leq 0,4 s$ max. 3 mm	$h \leq 0,2 s$ max. 2 mm	
12. 1	Lipsă de pătrundere (pătrundere incompletă), sudură în colț	-	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
				Imperfecțiuni scurte:		
				$h \leq 0,3 a$ max. 3 mm	$h \leq 0,2 a$ max. 1,5 mm	$h \leq 0,1 a$ max. 1 mm
13	Poziționare greșită, sudură în colț	-	Un rost excesiv sau insuficient între piesele de îmbinat. Rosturile h care depășesc limitele prevăzute, pot fi compensate în unele cazuri de o creștere corespunzătoare a grosimii sudurii.	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 a$ max. 4 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,15a$ max. 3 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1 a$ max. 2 mm
14	Crestătură continuă sau Crestătură intermitentă	5011	Se admit numai cu treceri line. Adâncimea crestăturii	Imperfecțiuni lungi:		
		5012	Adâncimea crestăturii	$h \leq 0,6 \text{ mm}$	$h \leq 0,4 \text{ mm}$	$h \leq 0,2 \text{ mm}$
				Imperfecțiuni scurte:		
15	Îngroșare excesivă ¹⁾	502	Se admit numai cu treceri line. Dimensiunea relativă	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,2 b$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15b$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,1 b$
			Dimensiunea absolută	max. 10 mm	max. 7 mm	max. 5 mm
16	Convexitate excesivă	503	Dimensiunea relativă	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,3 b$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,15b$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,1 b$
			Dimensiunea absolută	max. 5 mm	max. 4 mm	max. 3 mm
17	Sudură în colț cu grosimea mai mare decât grosimea nominală	-	În multe aplicații o grosime a sudurii mai mare decât cea nominală poate să nu fie o cauză de respingere.	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,3 a$ max. 7 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,2 a$ max. 6 mm	$h \leq 1 \text{ mm} + 0,15 a$ max. 5 mm

18	Sudură în colț cu grosimea mai mică decât grosimea nominală	-	O sudură în colț cu grosimea aparentă mai mică decât cea prescrisă nu trebuie să fie respinsă dacă grosimea efectivă, compensată cu o adâncime de pătrundere mai mare, corespunde cu valoarea nominală. Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
				Imperfecțiuni scurte:		
				$h \leq 0,3 a$ max. 2 mm	$h \leq 0,2 a$ max. 1,5 mm	$h \leq 0,1 a$ max. 1 mm
19	Exces de pătrundere	504	Dimensiunea absolută	$h \leq 5 \text{ mm}$	$h \leq 4 \text{ mm}$	$h \leq 3 \text{ mm}$
20	Nealinire axială la sudură circulară	507	Limitele se referă la abaterile față de poziția corectă. Dacă nu se specifică altfel, poziția corectă este aceea în care axele coincid (a se vedea de asemenea cap. 1) (se referă la grosimea cea mai mică).	$h \leq 0,6 \text{ mm} + 0,25 s$ max. 4 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,15 s$ max. 3 mm	$h \leq 0,5 \text{ mm} + 0,1 s$ max. 2,5 mm
				$h \leq 0,5 s$		
				max. 4 mm	max. 3 mm	max. 2,5 mm
21	Subțiere	511	Se admit numai cu treceri line. Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
				Imperfecțiuni scurte:		
				$h \leq 0,2 s$ max. 2 mm	$h \leq 0,1 s$ max. 1,5 mm	$h \leq 0,05 s$ max. 1 mm
22	Asimetrie excesivă a sudurii în colț	512	Se presupune că nu s-a prescris în mod expres o sudură în colț asimetrică.	$h \leq 3 \text{ mm} + 0,3 a$	$h \leq 2 \text{ mm} + 0,25 a$	$h \leq 1,5 \text{ mm} + 0,2 a$
23	Retasură la rădăcină	515	Numai cu treceri line:	Imperfecțiuni lungi: Nu se admit		
	Crestătură la rădăcină	5013	Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Imperfecțiuni scurte:		
				$h \leq 0,2 s$ max. 2 mm	$h \leq 0,1 s$ max. 1,5 mm	$h \leq 0,05 s$ max. 1 mm
24	Imperfecțiuni multiple într-o secțiune transversală	-	Pentru grosimi $s < 10 \text{ mm}$ sau $a < 10 \text{ mm}$ sau mai mici, sunt necesare condiții speciale Dimensiunea relativă Dimensiunea absolută	Valoarea maximă a sumei înălțimilor tuturor imperfecțiunilor scurte Σh		
				$0,3 s$ sau $0,3 a$ max. 10 mm	$0,25 s$ sau $0,25 a$ max. 10 mm	$0,2 s$ sau $0,2 a$ max. 10 mm

Tabelul 8

Nr. crt.	Tipuri de discontinuități și condiții de control	Produse netubulare		Produse tubulare (orice solicit)
		solicitare statică	solicitare variabilă	
1	Porozități. La îmbinări cap la cap prelucrate, complet pătrunse, orientate transversal în raport cu direcția solicitării nu se admit porozități tubulare. Pentru toate îmbinările cap la cap și de colț suma porozităților tubulare vizibile de 1 mm, sau mai mari nu este permis să depășească 10 mm pe orice direcție a cusăturii, și nu este permis să depășească 19 mm, pe o lungime de 305 mm de cordon de sudură.	x		
	Frecvența porozităților tubulare în suduri de colț nu este permis să depășească 1 pe o lungime de 100 mm iar diametrul maxim nu este permis să depășească 2 mm. Se exceptează îmbinările de colț la elemente de rigidizare unde suma diametrelor porozităților tubulare trebuie să nu depășească 10 mm pe orice direcție în cusătură și nu trebuie să depășească 19 mm la o lungime de îmbinare de 305 mm.		x	x
	Îmbinările cap la cap prelucrate, complet pătrunse, transversale față de direcția de solicitare nu este permis să conțină porozități tubulare. Pentru orice altă îmbinare cap la cap pătrunsă frecvența porozităților tubulare nu poate depăși 1 la 100 mm lungime, iar diametrul maxim nu poate depăși 2 mm.		x	x
2	Crestături. La piese cu grosime sub 25 mm, adâncimea creștăturii nu este permis să depășească 1 mm, cu excepția situației când suma lungimilor cumulată nu depășește 50 mm la o lungime de îmbinare de 305 mm, în acest caz acceptându-se o adâncime de maximum 1,6 mm.	x		
	La elemente principale din structură creștătura nu este permis să depășească adâncimea de 0,25 mm, dacă îmbinarea este transversală față de direcția solicitării la orice mod de solicitare. Creștătura nu poate depăși 1 mm adâncime în orice alt caz.		x	x

d. Discontinuitățile izolate ca și grupările de discontinuități rotunde a căror sumă pe direcția dimensiunii maxime depășește valoarea de la pct. a. Distanța minimă dintre două grupări de discontinuități sau până la o altă discontinuitate rotundă sau alungită, până la marginea sudurii, respectiv a unei îmbinări de intersecție, trebuie să fie de cel puțin 3 ori dimensiunea maximă a celei mai mari discontinuități.

e. Suma discontinuităților individuale având 2 mm sau sub 2 mm, nu este permis să depășească 10 mm pe orice lungime de 25 mm a cusăturii. Această condiție este independentă de a), b) și c).

f. Discontinuitățile aliniate a căror sumă a celor mai mari dimensiuni excede grosimea îmbinării, pe orice lungime de $6s$ a îmbinării. Dacă lungimea îmbinării este sub $6s$, suma dimensiunilor maxime a discontinuităților, trebuie să fie proporțional mai mică.

Elemente netubulare solicitate variabil

La elementele netubulare solicitate variabil la întindere nivelele de admisibilitate a discontinuităților sunt mai severe decât în cazul precedent. Dimensiunile maxime admise a porozităților sau a lipsei de topire de 1.6 mm sau mai mari, precum și distanțele minime dintre discontinuități, sau dintre discontinuități și orice margine de îmbinare se stabilesc cu ajutorul nomogramelor din [155]. La elementele solicitate variabil la compresiune condițiile de acceptare a dimensiunilor discontinuităților volumice sunt mai largi, în schimb condițiile de distanță minimă între ele rămân identice.

Elemente tubulare

La elemente tubulare se aplică aceleași criterii de admisibilitate a discontinuităților ca și în cazul îmbinărilor sudate la elemente netubulare (condițiile a - f). cu excepția zonei de intersecție dintre îmbinări sau a zonelor de margine (muchie). În aceste zone condițiile de acceptare a discontinuităților sunt:

Cazul I - discontinuități alungite, situate la intersecția a două suduri.

Dimensiunea maximă (diametru sau lungime) sub $s/3$, respectiv 6 mm, la piese de grosime $s \leq 50$ mm, respectiv sub 9 mm la piese de grosime $s > 50$ mm. Distanța dintre două discontinuități învecinate trebuie să fie de trei ori mai mare decât diametrul sau lungimea discontinuității (se ia cea mai mare dimensiune).

Cazul II - discontinuități situate în zone de margine.

Dimensiunea maximă admisă a discontinuităților rotunde este sub $s/3$, respectiv 6 mm la piese de grosime $s \leq 50$ mm și sub 9 mm la piese de grosime $s > 50$ mm.

Distanța până la marginea piesei trebuie să fie de trei ori lungimea discontinuității, la discontinuități alungite, lungimea maxim admisă este $2s/3$, iar distanța minimă de la capăt până la marginea piesei de trei ori lungimea discontinuității sau de două ori grosimea piesei (se ia cea mai mare dimensiune).

Criteriul etaloanelor de porozitate după ASME.

Etaloanele de porozitate se aplică la îmbinările sudate ale recipientelor și tubulaturilor sub presiune la întreaga gamă de oțeluri și metale neferoase. Aria totală de porozitate nu depășește $1,6s$ (mm) la o lungime de referință de 150 mm. Dacă lungimea îmbinării este sub 150 mm, aria de porozitate se reduce proporțional.

Dimensiunea maximă a porilor este de $0,2s$, respectiv 3 mm, cu excepția porilor izolați aflați la o distanță de peste 25 mm unul de celălalt, unde se acceptă până la $0,3s$, și/sau 6

mm. Porozițiile aliniate sunt admise dacă suma diametrelor nu depășește grosimea s (mm) pe o lungime de 12s sau de 150 mm și dacă distanța dintre oricare doi pori învecinați depășește de 6 ori diametrul celui mai mare. Cuiburile de porozități pot să ocupe o suprafață a cărei dimensiune maximă este de 0,24s, la o lungime de 25 mm sau de 2s. Etaloanele de porozitate [153] conțin 11 grosimi cuprinse în intervalul 3 – 100 mm și sunt alcătuite, în funcție de mărimea și densitatea porilor, pentru patru grade de acceptare: grosolan, mediu, fin și amestecat. Suprafața totală a porozității admise variază de la 4,85 mm la etalonul de grosime $s = 3$ mm, la 154,84 mm la etalonul de grosime $s = 100$ mm.

Criterii de admisibilitate a imperfecțiunilor la controlul ultrasonic, după AWS.

Criteriul aplicat de AWS este unul rezolutiv. El stabilește nivele de acceptare a semnalelor de discontinuitate față de curba de referință CAD obținută cu ajutorul orificiului de $\Phi = 1,5$ mm al blocului de calibrare A1. Nivelul zgomotului de fond (zero) este amplificat în funcție de distanța parcursului sonor cu un număr de dB, care rezultă din tabelul 9. Se observă că în coloana aparținând elementelor netubulare solicitate variabil, nivelele de amplificare exced cu 6 dB pe cele corespunzând semnalelor provenite de la îmbinări sudate ale elementelor netubulare solicitate static.

Tabelul 9

Distanța parcursului sonor (mm)	Amplificarea semnalului față de nivelul zero (dB)	
	Elemente netubulare	
	Solicitare statică	Solicitare variabilă
< 65	14	20
65 – 130	19	25
130 – 250	29	35
250 – 380	39	45

Aceasta confirmă exigența sporită în ce privește mărimea semnalelor reflectate de la discontinuități și implicit în ce privește mărimea discontinuităților admise la îmbinări din piese solicitate variabil.

La obținerea unui semnal reflectat de la o discontinuitate detectată în cursul controlului se determină surplusul de amplificare necesar pentru atingerea nivelului de referință. Acest surplus de amplificare este indicat pe clase de severitate a discontinuităților în tabelul 10 pentru îmbinări sudate la elemente netubulare solicitate static și în tabelul 11 pentru îmbinări sudate la elemente netubulare solicitate variabil. În cazul discontinuităților localizate la rădăcina sudurii, dată fiind pericolozitatea crescândă, nivelele de amplificare indicate în tabelele 10 și 11 se vor mări cu 4 dB.

Clasa A cuprinde discontinuități lungi, clasa B discontinuități de anvergură medie, clasa C, discontinuități înguste, iar clasa D, discontinuități minore.

Interpretarea rezultatului examinării cu ultrasunete pe baza criteriului de admisibilitate AWS se face astfel:

- La discontinuitățile din îmbinări supuse la solicitări statice în clasa A, orice indicație de defect din această categorie indiferent de lungime se respinge. În clasa B orice indicație de defect care are o lungime mai mare de 19 mm se respinge. În clasa C orice indicație de

defect cu o lungime mai mare de 50 mm se respinge. În clasa D indicațiile se admit în urma analizării lungimii și localizării lor.

Tabelul 10

Clasa de severitate a discontinuității	Grosimea sudurii (mm) și unghiul de incidență										
	8 - 20	20 - 40	40 - 65			65 - 100			100 - 200		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
A	+5 și mai puțin	+2 și mai puțin	-2 și mai puțin	+1 și mai puțin	+3 și mai puțin	-5 și mai puțin	-2 și mai puțin	0 și mai puțin	-7 și mai puțin	-4 și mai puțin	-1 și mai puțin
B	+6	+3	-1 0	+2 +3	+4 +5	-4 -3	-1 0	+1 +2	-6 -5	-3 -2	0 +1
C	+7	+4	+1 +2	+4 +5	+6 +7	-2 la +2	+1 +2	+3 +4	-4 la +2	-1 la +2	+2 +3
D	+8 și mai mult	+5 și mai mult	+3 și mai mult	+6 și mai mult	+8 și mai mult	+3 și mai mult	+3 și mai mult	+5 și mai mult	+3 și mai mult	+3 și mai mult	+4 și mai mult

Tabelul 11

Clasa de severitate a discontinuității	Grosimea sudurii (mm) și unghiul de incidență										
	8 - 20	20 - 40	40 - 65			65 - 100			100 - 200		
	70°	70°	70°	60°	45°	70°	60°	45°	70°	60°	45°
A	+10 și mai puțin	+8 și mai puțin	+4 și mai puțin	+7 și mai puțin	+9 și mai puțin	+1 și mai puțin	+4 și mai puțin	+6 și mai puțin	-2 și mai puțin	+1 și mai puțin	+3 și mai puțin
B	+11	+9	+5 +6	+8 +9	+10 +11	+2 +3	+5 +6	+7 +8	-1 0	+2 +3	+4 +5
C	+12	+10	+7 +8	+10 +11	+12 +13	+4 +5	+7 +8	+9 +10	+1 +2	+4 +5	+6 +7
D	+13 și mai mult	+11 și mai mult	+9 și mai mult	+12 și mai mult	+14 și mai mult	+6 și mai mult	+9 și mai mult	+11 și mai mult	+3 și mai mult	+6 și mai mult	+8 și mai mult

- La discontinuitățile situate în îmbinări sudate supuse solicitărilor variabile interpretarea claselor de severitate este identică cu cea de la îmbinările solicitate static, făcând excepție doar clasa C. În acest caz în clasa C se respinge orice indicație având o lungime mai mare de 50 mm și provenită din zona situată în mijlocul grosimii, sau care depășește lungimea de 19 mm și provine din pătrimea situată către suprafață sau la partea inferioară a secțiunii.

4.3. Nivele de admisibilitate a discontinuităților la piese turnate

La piesele turnate din oțel limitele de admisibilitate sunt stabilite pe nivele de severitate în strictă concordanță cu metoda de control aplicată [173], [174], [175], [176]. La controlul cu metode de detectare a discontinuităților de suprafață standardele fixează numărul, diametrul sau lungimea discontinuităților maxim admise într-un format A6, de 105 mm x 148 mm. Se iau în considerație indicațiile neliniare, indicațiile liniare și/sau indicațiile

aliniate. În cazul indicațiilor liniare și/sau a celor alungite nivelele de severitate se diferențiază pe următoarele trei domenii de grosimi: $s \leq 16$ mm, $16 < s \leq 50$ mm și $s > 50$ mm.

În tabelul 12 sunt indicate limitele de acceptare a imperfecțiunilor detectate la piese turnate din oțel cu metoda lichidelor penetrante, [176].

Tabelul 12

Nivelul de severitate		001	01	1		2		3		4		5	
Diametrul D sau lungimea L a celei mai mici indicații considerate (mm)		0,3		1,5		2		3		5		10	
Indicații nelineare $L < 3b$	Numărul de indicații	5	5	8		8		12		20		32	
	Dimensiuni (mm)	≤ 1	≤ 1	≤ 3		≤ 6		≤ 9		≤ 14		≤ 21	
Indicații liniare $L > 3b$ sau aliniate b – lățimea indicației	Tipul indicațiilor	Izolate sau cumulate	Izolate sau cumulate	Izo-late	Cu-mu-late	Izo-late	Cu-mu-late	Izo-late	Cu-mu-late	Izo-late	Cu-mu-late	Izo-late	Cu-mu-late
	Grosimea $s \leq 16$ mm	0	1	2	4	4	6	6	10	10	18	18	25
	Grosimea $16 < s \leq 50$ mm	0	1	3	6	6	12	9	18	18	27	27	40
	Grosimea $s > 50$ mm	0	2	5	10	10	20	15	30	30	45	45	70

În tabelul 13 sunt indicate limitele de acceptare a imperfecțiunilor detectate la piese turnate din oțel cu metoda pulberilor magnetice [175].

Tabelul 13

Nivelul de severitate		001	01	1		2		3		4		5	
Lungimea L a celei mai mici indicații luate în considerație (mm)		0,3		1,5		2		3		5		10	
Grupare de indicații nelineare	Suprafață totală (mm ²)	-	-	10		35		70		200		500	
	Lungime individuală (mm)	1	1	2		4		6		10		16	
Indicații lineare L > 3b sau aliniate b – lățimea indicației	Tipul indicațiilor	Izo- late sau cumu- late	Izo- late sau cumu- late	Izo- late	Cu- mu- late	Izo- late	Cu- mu- late	Izo- late	Cu- mu- late	Izo- late	Cu- mu- late	Izo- late	Cu- mu- late
	Grosimea s ≤ 16 mm	0	1	2	4	4	6	6	10	10	18	18	25
	Grosimea 16 < s ≤ 50 mm	0	1	3	6	6	12	9	18	18	27	27	40
	Grosimea s > 50 mm	0	2	5	10	10	20	15	30	30	45	45	70

Criteriile de acceptare a imperfecțiunilor detectate cu ultrasunete la piese turnate se referă la suprafața maximă a unei imperfecțiuni izolate, respectiv la suprafața totală, și anume defalcate pe două categorii: discontinuități plane și discontinuități volumice.

Evaluarea are loc în zona miezului piesei și în zonele marginale, ultimele cuprinzând câte o grosime de 1/3s, unde s - este grosimea totală a piesei, respectiv maximum 30 mm. Nivelele de severitate sunt: 1, 2 și 3 la discontinuități plane, și 1 -5 la discontinuități volumice, definite în ordinea descrescătoare a calității. În tabelul 14 sunt prezentate dimensiunile maxime ale indicațiilor plane cuprinse într-un format A6, după [174].

Tabelul 14

Indicația de imperfecțiune într-o suprafață de 110 x 160 mm	Nivelul de severitate		
	1	2	3
Suprafața maximă a indicației izolate (mm ²)	40	65	100
Suprafața maximă totală a indicației (mm ²)	65	100	160

În tabelul 15 sunt arătate dimensiunile maxime ale indicațiilor de tip volumic, cuprinse într-un format 317 x 317 = 100.000 mm², după [174].

La piesele turnate din aluminiu și aliajele sale, examinate cu lichide penetrante sunt stabilite șase nivele de acceptare a discontinuităților. Criteriile de evaluare pe cele șase nivele sunt: diametrul celei mai fine discontinuități D, numărul maxim de indicații și dimensiunea maximă a discontinuităților de tipul suflurilor, porilor, incluziunilor și retasurilor. Suprafața de referință este formatul A6. Tabelul 16 prezintă limitele de acceptare pe nivelele 01, 02, 03, 1, 2 și 3. În cazul discontinuităților nelineare, după [173].

Tabelul 15

Limitele dimensiunilor indicate	Nivelul de severitate				
	1	2	3	4	5
Lungimea maximă indicată raportată la grosimea zonei (%)	10	20	20	20	20
Suprafața maximă cu indicații de discontinuități izolate (mm ²)	100	250	1.000	2.000	4.000
Suprafața maximă totală cu indicații de discontinuități (mm ²)	2.500	5.000	10.000	20.000	40.000
Dimensiunea relativă a indicației maxime % din grosime	10	10	10	15	15
Suprafața maximă totală a indicațiilor de discontinuități (mm ²)	3000	12.500	20.000	31.000	50.500

Tabelul 16

Nivelul de severitate	01	02	03	1	2	3
Diametrul D al celei mai fine indicații considerate (mm)	0.3	0.5	1	1,5	2	
Numărul maxim al indicațiilor	5	6	7	8	8	12
Dimensiunile maxime ale discontinuităților (mm):						
- izolate	1	1	1,5	3	5	8
- grupate (cu max. două pe zonă)	3	4	6	10	16	25

Distanța minimă între indicațiile grupate sau izolate este de două ori dimensiunea celei mai mari dintre indicații.

În tabelul 17 se indică limitele de admisibilitate a discontinuităților lineare sau aliniate, aflate într-o suprafață de format A6.

Tabelul 17

Nivelul de severitate	001	1		2		3		4		5	
Lungimea celei mai mici indicații considerate (mm)	0,3	1,5		2						3	
Dispunerea indicației	izolată sau grupată	izo- lată	gru- pată	izo- lată	gru- pată	izo- lată	gru- pată	izo- lată	gru- pată	izo- lată	gru- pată
Lungimea maximă a indicației aliniate sau lineare (mm)	0	2	4	4	6	6	10	16	25	40	63

5. CLASIFICAREA METODELOR INDUSTRIALE DE CONTROL NEDISTRUCTIV - CND

Metodele CND industriale ocupă după statisticile internaționale aproximativ 94% din volumul total al defectoscopiei nedistructive, numai 6% revenind unor metode mai puțin convenționale. Clasificarea metodelor CND ia în considerație criteriul adecvării la detectarea imperfecțiunilor funcție de localizarea acestora în piesă și anume: la suprafață sau subsuperficial până la câțiva milimetri adâncime, adică în exterior, respectiv complet incluzionate în secțiune sau în interior.

Metodele CND specializate spre detectarea imperfecțiunilor sau discontinuităților exterioare sunt:

- Metoda cu lichide penetrante, care are la bază efectul de capilaritate și de absorbție a unor substanțe contrastante, distingându-se:
 - metoda cu penetranți cu contrast de culoare;
 - metoda cu penetranți fluorescenți;
 - metoda cu penetranți activați.
- Metoda cu gaze penetrante, care se bazează pe efectul de capilaritate și cel de difuzie a radiației gama.
- Metoda cu pulberi magnetice, fundamentată pe formarea câmpului de dispersie la suprafața materialelor feromagnetice introduse într-un câmp magnetic. Dintre posibilități se disting:
 - metoda utilizând pulberi uscate;
 - metoda utilizând pulberi în suspensie lichidă;
 - metoda magnetografică.

Metodele CND specializate pe detectarea imperfecțiunilor sau discontinuităților interioare, nefiind excluse posibilitățile de detectare și a discontinuităților exterioare, sunt:

- Metoda radiografică, care are la bază interacțiunea radiațiilor penetrante cu pelicule fotosensibile. Se disting următoarele posibilități:
 - radiografia cu raze X, cu energii medii de 50 ÷ 500 kV;
 - radiografia cu raze X, de înaltă energie, situată în domeniul 0,5 ÷ 40 MeV;
 - radiografia cu radiații gama, folosind izotopi radioactivi ca: Ir, Co, Cs, Tm, Yb, Se, etc..
- Metoda radiosopică sau fluoroscopică, care se sprijină pe interacțiunea radiațiilor penetrante cu substanțe fluorescente.
- Metoda radiografică în timp real, care combină tehnica fluoroscopică cu posibilitățile de microfocalizare a radiației X.
- Metoda curenților turbionari, care se bazează pe principiul variației permeabilității magnetice în prezența discontinuităților din câmpul electromagnetic indus în piesă.
- Metoda sondelor de potențial, care funcționează pe principiul variației reluctanței magnetice.
- Metoda ferosondelor, care discriminează variațiile de inductanță din piesă.
- Metoda ultrasonică, fundamentată pe principiul propagării și reflexiei undelor elastice de înaltă și foarte înaltă frecvență 0,5 - 50 MHz, utilizând mai multe tipuri de reprezentări:
 - reprezentare A, semnal reflectat - timp (distanță);
 - reprezentări B, C, D - în diferite planuri;
 - metodele imaginerii procesate.

6. PREVEDERI PRIVIND NOTAREA ÎN DOCUMENTATIA DE EXECUTIE

Procedeul (metoda) de examinare nedistructivă se notează în documentația de execuție scrisă și desenată potrivit prevederilor [184], folosindu-se simbolizarea redată de tabelul 18.

Tabelul 18

Metode de verificare	Procedeul de verificare	Simbol
Optică	Vizual	V
Capilară	Cu lichide penetrante	LP
Cu radiații penetrante	Radiografic	RP
	Radioscopic	RR
	Prin ionizare	RI
Prin curenți turbionari	Prin curenți turbionari	CT
Acustică	Cu ultrasunete	US
	Cu emisie acustică	EA
Magnetică	Cu pulberi magnetice	PM
	Cu traductor feromagnetic	TF
	Magnetografic	M
Etanșeitate	Hidrostatic	E

Notarea pe desen se realizează prin intermediul unei linii de indicație și a unei linii de referință duble formată dintr-o linie continuă și una întreruptă, figura 17.

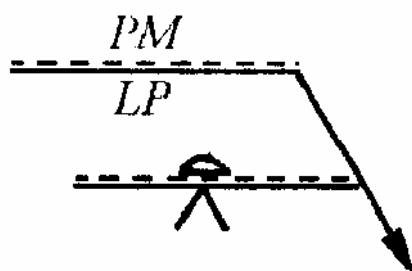


Fig. 17. Exemplu de notare a procedurii de examinare în documentația tehnică desenată

Linia de indicație se așează cu săgeata, fie direct pe zona (îmbinarea sudată) care se dorește a fi examinată, fie pe partea opusă. Pe linia de referință se notează simbolul procedurii de control, lungimea care se controlează sau numărul de examinări. Dacă examinarea se realizează de pe partea liniei de indicație notarea se face pe partea liniei pline de referință. Dacă în schimb examinarea se realizează de pe partea opusă liniei de indicație notarea se practică pe partea liniei întrerupte. Dacă sunt prevăzute două proceduri de control de pe aceeași parte, pe linia de referință se vor trece simbolurile corespunzătoare și semnul plus între ele. În figura 17, pe linia de referință a controlului este prevăzut un control cu lichide penetrante de pe partea liniei de indicație, respectiv un control cu pulberi magnetice de pe partea opusă liniei de indicație. Neprevăzându-se lungimea sau numărul de examinări, controlul se va realiza pe toată lungimea la care se referă indicația. Semnificația notației de pe linia de referință inferioară este că partea indicată se referă la o îmbinare sudată cap la cap cu rostul în V, pe partea opusă liniei de indicație, îmbinarea având prevăzută completarea rădăcinii.

7. CAPABILITATEA METODELOR DEFECTOSCOPIEI NEDISTRUCTIVE

7.1. Criterii și recomandări generale privind alegerea metodei

Capabilitatea metodelor defectoscopiei nedistructive este definită pe baza următoarelor criterii:

- rata de identificare și de localizare a discontinuităților;
- precizia de determinare a dimensiunilor discontinuității în lungime și în lățime (adâncime);
- mărimea (dimensiunea) minim detectabilă sau sensibilitatea metodei;
- capacitatea de rezoluție sau de relevare a două discontinuități apropiate sau suprapuse;
- recunoașterea naturii discontinuității volumice, plane, variații de structură și/sau de formă;
- productivitatea detectării.

Datorită particularităților derivate din principiul funcționării și a scopului urmărit în aplicarea tehnicilor de control, capabilitatea de detectare trebuie coroborată și cu alte criterii de alegere a metodelor de control.

O privire de ansamblu asupra capabilității principalelor metode de control nedistructiv industriale rezultă potrivit [103] din consultarea tabelului 19.

Tabelul 19

Nr crt	Metode	Identificare discontinuitate		Evaluare		
		Superficială	Subsuperficială	Natură	Lungime	Adâncime
1	Lichide penetrante	FB	X	B	FB	X
2	Pulberi magnetice	FB ¹⁾	S	B	FB	X
3	Curenți turbionari	FB	B	S	FB	B
4	Sonde de potențial	FB	X	S	FB	B
5	Radiografice	FB ²⁾	FB ²⁾	FB	FB	X
6	Ultrasonice	B (FB)	FB	S	FB	FB

Aprecieri: FB - Foarte bine; B -- bine; S - suficient ; X - neadecvat.

1) în exclusivitate la materiale feromagnetice:

2) dependență accentuată de aliniere în raport cu axa fasciculului de radiații.

7.2. Gradul de identificare și evaluare a dimensiunilor discontinuităților

Cercetări sistematice asupra capacității de detectare a discontinuităților au fost realizate în cadrul Institutului de sudură din Franța la care au contribuit NDT Center Harwell, Inter Controle și Institutul Framatome [31], [70], [71]. Datorită diversității discontinuităților și dispersării la îmbinările sudate, obiectul investigațiilor l-au constituit îmbinări sudate cap la cap cu rostul în V și în X, grosimile pieselor fiind cuprinse în intervalul 10 ÷ 100 mm. Principalele categorii și tipuri de discontinuități urmărite au fost conform [259]:

1. Defecte interne: fisuri, simbol 1011, sufluri și pori, simbol 2011, 2013, 2015, incluziuni solide, simbol 3012, 3013, lipsă de topire, simbol 4011, 4012, lipsă de pătrundere, simbol 402.

2. Defecte deschise la suprafață sau la rădăcină: fisuri tehnologice, simbol 101, 1011, 1012, 1013, fisuri de oboseală, simbol 1013, lipsă de topire, simbol 4013, retasuri la rădăcină, simbol 515, exces de pătrundere, simbol 504.

La defectele din categoria celor volumice s-a determinat diametrul echivalent D_e (lungimea) iar la defectele din categoria celor plane și la cele asimilate lor s-au determinat lungimea l și lățimea sau înălțimea h .

Pentru a conferi, pe de o parte un grad de confidență statistică, iar pe de altă parte, condiții cât mai apropiate criteriilor de relevanță a metodelor de control utilizate în raport cu natura discontinuităților urmărite, îmbinările sudate examinate au cuprins în medie 150 tipodimensiuni de discontinuități - defecte. Astfel, rezultatele au putut fi considerate reprezentative și totodată concludente pentru toate zonele examinate în îmbinări.

Capabilitatea metodelor de control investigate a fost definită pe baza următoarelor criterii, [179]:

- rata de identificare (localizare) a discontinuităților fin dispersate și recunoașterea naturii acestora (volumice sau plane);
- precizia de determinare a dimensiunilor în lungime și lățime (adâncime);
- sensibilitatea detectării;
- productivitatea detectării.

Datorită particularităților reieșite din principiile tehnicilor de examinare capabilitatea trebuie înțeleasă selectiv, coroborându-se metoda cu zona investigată, natura și caracteristicile discontinuităților urmărite.

- Metode de examinare.

Pornind de la principalele neajunsuri ale metodelor uzuale, convenționale de examinare nedistructivă:

- insuficienta capacitate de discriminare a naturii defectului mai ales în defectoscopia ultrasonoră;
- irelevanța pentru defecte plane defavorabil orientate față de direcția de iradiere în defectoscopia radiografică și radiosopică;
- imposibilitatea determinării exacte a dimensiunii defectului în adâncime (lățime) în special la metodele radiografică și radiosopică.

Studiul a luat în considerație un număr exhaustiv de metode dezvoltate în ultimele două decenii. Ele au fost selectate pe baza concludenței față de obiectivele urmărite: determinarea lungimii l și determinarea lățimii sau înălțimii defectului, h , și sunt redate în tabelul 20. Cu toate acestea se menționează că unele metode nu au fost adecvate pentru situația sudurilor și a defectelor cuprinse în experiment. De asemenea se menționează că, strict pentru identificarea defectelor, față de cele cuprinse în tabelul 20, s-au mai folosit metodele de recunoaștere după forma undei reflectate: ROSE, analiza lineară discriminantă ALD, recunoaștere adaptivă a undelor reflectate ALN, sistemele expert CASCADE și SIRACUS, criteriul Gurvich, timpul dinamic (T.Dyn), metoda combinată

amplitudine semnale - mod de conversie a undelor (Cony. Mode), precum și metoda undei transversale (OT35°).

- Evaluarea rezultatelor

Studiul comparativ s-a plasat în special în zona primelor două criterii de capabilitate. În vederea confirmării gradului de identificare la îmbinările cu defecte naturale s-a folosit succesiv controlul radiografic și analiza fractografică în secțiunea transversală a discontinuităților - defectelor.

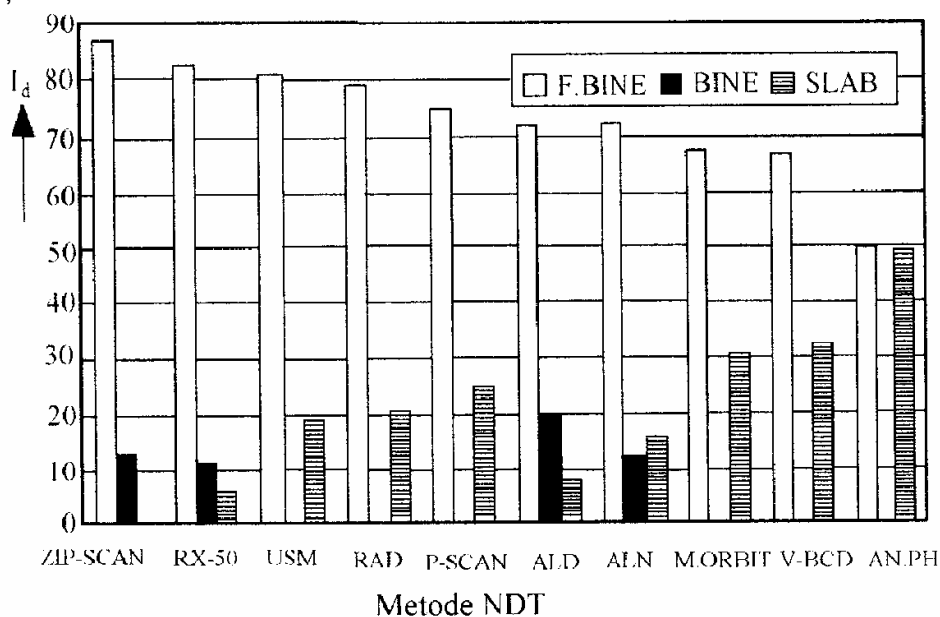


Fig. 18 Gradul de identificare I_d , a discontinuităților externe la diferite metode CND

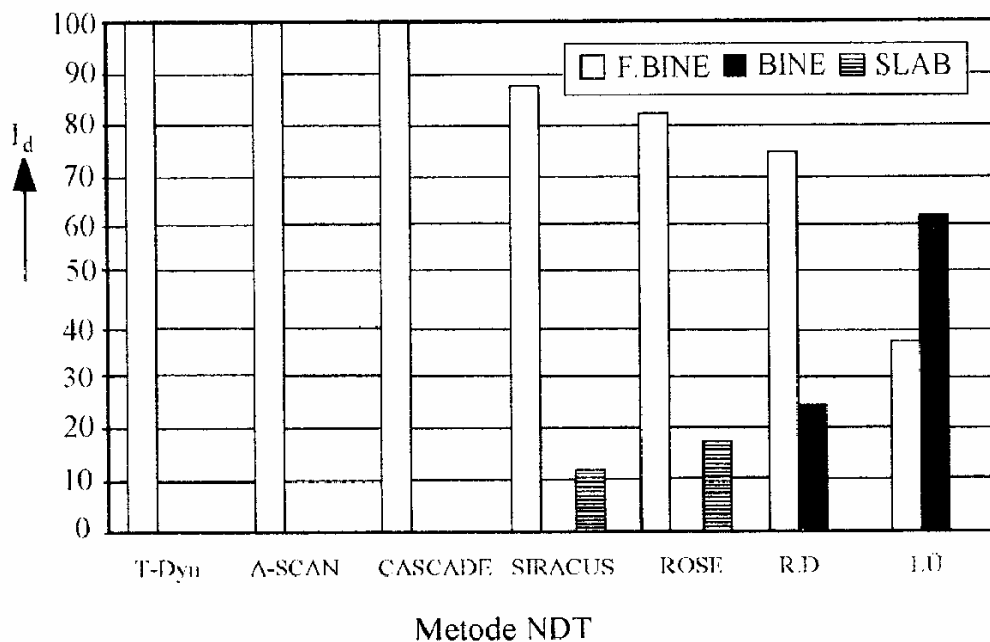


Fig. 19. Gradul de identificare I_d , a discontinuităților interne la diferite metode CND

Tabelul 20

Nr crt	Obiectivul examinării	Metode de examinare aplicate	
		Simbolizare	Succintă definiție a metodei
1	Identificarea în general a discontinuităților	ZIP-Scan	Examinare informatizată cu ultrasunete, vizualizare B și D
2		RX 50	Metoda radiografică după umplere în proporție de 50% a sudurii
3		USM	Examinare convențională, manuală cu ultrasunete prin limitarea cu - 6 dB.
4		RAD	Metoda radioscopică cu prelucrarea automată a imaginii
5		P-Scan	Examinare informatizată cu ultrasunete, vizualizare, B, C și D
6		ALD	Recunoașterea undelor prin analiză lineară
7		ALN	Recunoașterea undelor reflectate prin metoda adaptivă
8		M.Orbit.	Metoda mișcării orbitale a palpatorului
9		V.BCD	Examinare cu fascicul focalizat, vizualizare în sistemele B, C și D
10		AN.PH	Metoda analizei de fază prin alternarea polarității semnalelor
11	Identificarea discontinuităților interioare	T-Dyn.	Reprezentarea ecodinamicii undelor longitudinale
12		A-Scan	Examinare clasică cu ultrasunete în reprezentare A
13		CASCADE	Metodă de identificare informatizată pe baza evaluării caracteristicilor de reflexie, modificării ecodinamicii și dinamicii timpului
14		SIRACUSE	Metodă de identificare informatizată pe baza criteriilor de caracterizare a discontinuităților interioare
15		ROSE	Sistem de identificare a undelor reflectate pe baza analizei lineare computerizate
16		R.D.	Metodă de recunoaștere și evaluare a unei direcționale în reprezentare A
17		L.Ū	Discriminarea cu ajutorul analizei Fourier a fascicului de unde reflectate
18	Determinarea lungimii (l)	Rx50, Rx100	A se vedea poz. 2 și Rx după completarea 100% a cusăturii
19		ECH.DYN	Analiza ecografiei la examinarea automată cu metoda limitării prin - 6 dB.
20		USM	A se vedea poz. 3
21		M.Orbit.	A se vedea poz. 8
22		V.BCD	A se vedea poz. 9
23		P.Scan	A se vedea poz. 5
24		Zip.Scan	A se vedea poz. 1
25	Determinarea lățimii sau înălțimii (h)	OT60°, OT35°	Examinare cu unde transversale de difracție la incidența de 60°, respectiv la incidența de 35°
26		Zip.Scan	A se vedea poz. 1
27		Conv.Mode	Metoda folosind transformarea pe discontinuități a undelor transversale în unde Rayleigh
28		AN.PH.	A se vedea poz. 10
29		P.Scan	A se vedea poz. 5
30		M.Orbit	A se vedea poz. 8
31		V.BCD	A se vedea poz. 9

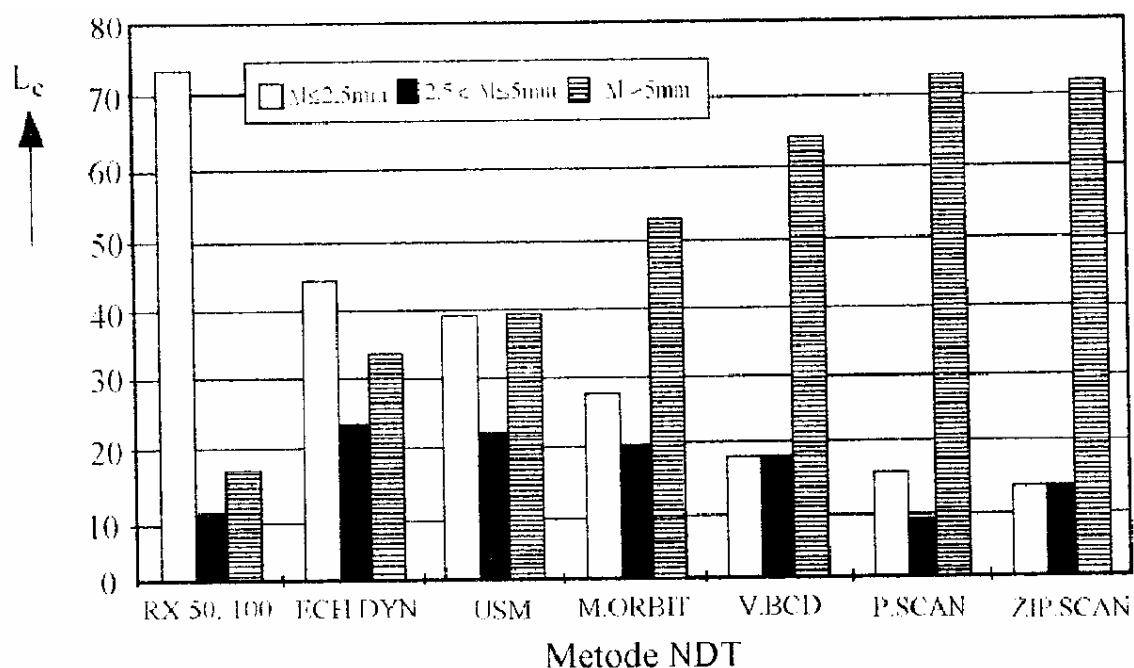


Fig. 20. Capacitatea de evaluare L_e a lungimii defectelor la diferite metode CND

- Gradul de identificare (recunoaștere) a categoriei defectului luând în considerare ambele categorii de defecte, rezultatele sunt prezentate în graficul din figura 18. Se observă că indicii cei mai ridicați au fost asigurați de către următoarele metode: ZIP-SCAN (87,5%), Rx50 (83%), USM (81%) și P-SCAN (75%). Dacă se au în vedere numai defectele interne atunci situația redată în figura 19 pune în evidență superioritatea metodelor: T-Dyn și A-SCAN (100%), sistemele expert CASCADE (100%) și SIRACUS (87%) și metoda ROSE (84,5%). În particular la defectele de rădăcină, indici superiori de identificare au furnizat metodele: T. dyn (97,5%), Conv. Mode (94%) și OT35° (83,5%).

- Determinarea lungimii defectelor

Principalele rezultate sunt sintetizate în figura 20 departajate pe trei nivele în funcție de eroarea absolută Δl . Dacă se ia în considerație eroarea $\Delta l \leq 2,5$ mm, atunci se observă că indicii de performanță sunt inferiori: Rx50 (74%), ECH.DYN (44%) și USM (39%). Dacă se admite eroarea $\Delta l \leq 5$ mm, atunci capacitatea metodelor crește la următoarele cote: RX50 (84%), ECH.DYN (67%) și USM (61%).

- Determinarea lățimii (înălțimii) defectelor.

Parametrul lățime defect este de maximă importanță, deoarece în primul rând lățimea condiționează încadrarea multor categorii de defecte în clase de calitate.

Rezultatele sunt prezentate în figura 21 pe cele trei nivele de erori exprimate în valori absolute. Se observă că indici superiori se obțin numai prin acceptarea unei erori de $\Delta h \pm 1,5$ mm. În această situație metodele se clasează astfel: OT60° (100%), AN.PH (66%), CONV.MODE (64%) și ZIP-SCAN (62,5%).

Studii care operează asupra defectelor îmbinărilor sudate la rezervoare [2] sunt mai optimiste indicând valori de performanță superioară.

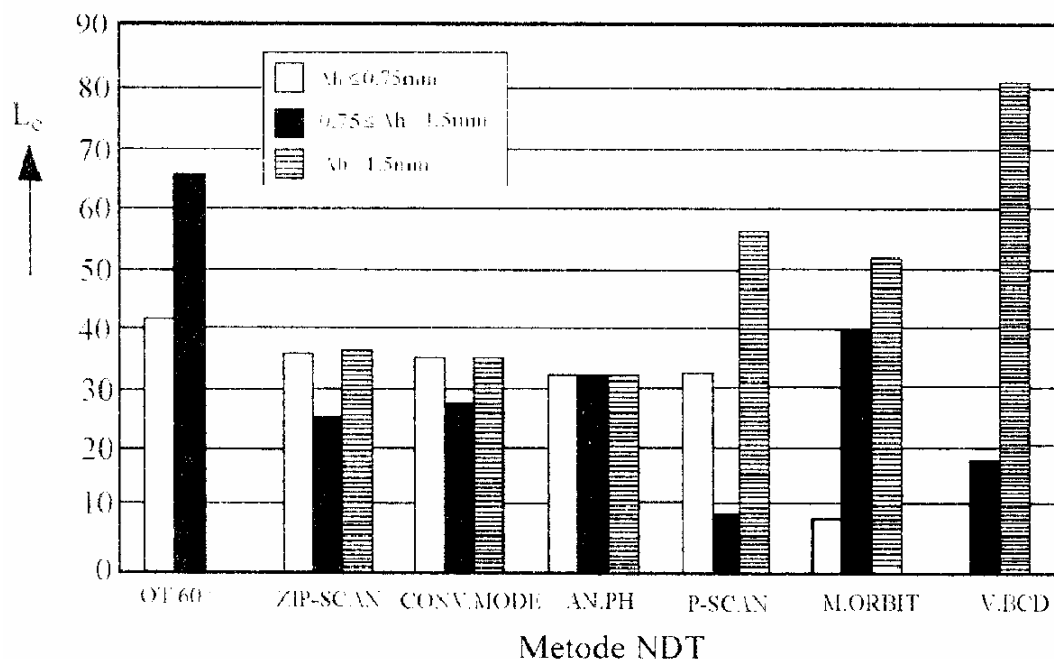


Fig 21. Capacitatea de evaluare L_c a adâncimii (lățimii) defectelor la diferite metode CND

7.3. Evaluarea fisurilor de oboseală

În cazul fisurilor de oboseală [183], având în general o evoluție pe suprafețe curbate și complexe, precizia de evaluare a dimensiunilor este inferioară celorlalte tipuri de fisuri generate tehnologic, respectiv a unor creștături mecanice. Lungimea unei fisuri superficiale de 2 mm poate fi estimată cu o precizie de ± 1 mm cu pulberi magnetice fluorescente, în curent alternativ. Prezența unei fisuri cu o profunzime de peste 1 mm poate fi detectată prin metoda ultrasonică, iar de la profunzimi de peste 2,5 mm precizia de estimare este de ± 1 mm. Fisuri de oboseală subsuperficiale a căror lungime depășește 5 mm pot fi detectate prin metoda curenților turbionari.

7.4. Alte criterii de alegere a metodei de control

Alegerea metodei de control se face luând în primul rând în considerație capabilitatea determinată de limitele de sensibilitate. O serie de alți factori exercită însă o influență directă sau indirectă asupra rezultatului controlului. Acești factori pot fi grupați în următoarele categorii:

- factori de material;
- factori de formă și dimensiune;
- factori ce țin de felul discontinuității.
- Factorii de material intervin și ei la alegerea metodei CND, [45].

O vedere de ansamblu asupra influenței materialelor în alegerea metodelor defectoscopice și calificarea aplicabilității rezultă din tabelul 21.

Tabelul 21

Nr crt	Felul materialului	Metode de control			
		Lichide penetrante	Pulberi magnetice	Radiații penetrante	Ultrasunete
1	Oțeluri feritice	FB	FB	FB	FB
2	Oțeluri austenitice	FB	X	FB	S
3	Oțeluri austenito/feritice	FB	B	FB	S
4	Aluminiu și aliaje	FB	X	FB	B
5	Materiale plastice	X	X	FB	S
6	Piese din fontă	B	FB	FB	S
7	Piese forjate	FB	FB	FB	FB

FB - foarte bună; B - bună; S - slabă; X - inutilizabilă.

Metodele magnetice nu sunt indicate la oțeluri cu structură austenitică, după cum la aluminiu, aliajele acestuia și la materiale nemetalice. Metoda ultrasonică este deosebit de sensibilă la structură, în special la mărimea granulației, fiind drastic limitată la dimensiuni mari ale constituenților structurali. Lichidele penetrante nu se pretează la controlul materialelor plastice. La aceste materiale și metoda ultrasonică este mai puțin eficientă.

• Forma și dimensiunile piesei, constituie de asemenea un factor de care trebuie să se țină seama în alegerea metodei de control, tabelul 22, [45].

Tabelul 22

Nr crt	Factori geometrici	Metode de control			
		Lichide penetrante	Pulberi magnetice	Radiații penetrante	Ultrasunete
1	Grosimea piesei	FB	FB	B	B
2	Starca suprafeței	B	B	B	FB
3	Poziția îmbinării sudate	B	B	B	B
4	Zona rădăcinii și supraînălțării	B	B	FB	B
5	Îmbinări de colț	FB	FB	B	B

• Grosimea, este un factor determinant în alegerea metodei de control. La grosimi mici, până la 6 ÷ 8 mm, metoda de control ultrasonic nu se poate aplica datorită zonei moarte. La grosimi mari, peste 80 mm, metoda de control radiografic necesită tensiuni mari de accelerare, care nu pot fi asigurate cu surse de radiații X convenționale, respectiv tensiuni echivalente foarte mari. De aceea, la astfel de grosimi, în afara acceleratoarelor de particule, care încarcă însă foarte mult costul controlului, rămâne ca alternativă controlul ultrasonic. Aplicarea controlului ultrasonic la îmbinări sudate de grosime mare implică alegerea adecvată a unghiului de incidență, respectiv obligativitatea examinării de pe ambele părți ale îmbinării, de pe ambele suprafețe și chiar de pe suprafața cusăturii.

Starea suprafeței influențează în special rezultatul controlului cu ultrasunete și cu radiații penetrante. Neregularități care întrec 1,5 - 3% din grosime afectează condițiile de cuplare, transfer și interpretare. În astfel de cazuri trebuie să se recurgă la prelucrarea suprafeței

de cuplare și a celei de reflexie. La piese de grosimi mari, când se impune și un control ultrasonic cu incidență normală, se necesită îndepărtarea supraînălțării cusăturii.

Analizând factorii specifici defectului, trebuie arătat că pentru evidențierea defectelor de suprafață cele mai operative și economice metode sunt cele cu lichide penetrante. Pentru detectarea discontinuităților superficiale plasate până la 2 - 4 mm de suprafață, cea mai eficientă se consideră metoda cu pulberi magnetice. Detectarea discontinuităților interne de profunzime se realizează cu ajutorul radiațiilor penetrante X sau gama, cu ajutorul ultrasunetelor, al sondelor de potențial sau cu ajutorul curenților turbionari.

Tabelul 23 sintetizează, după [45], relevanța metodelor CND în funcție de natura discontinuităților.

Tabelul 23

Nr crt	Natura discontinuității	Metode de control			
		Lichide penetrante	Pulberi magnetice	Radiații penetrante	Ultrasunete
1	Sufluri, pori, cavități	X	B	FB	B
2	Incluziuni nemetalice	X	X	FB	B
3	Lipsă de topire	B	B	B	B
4	Lipsă de pătrundere	FB	X	FB	FB
5	Fisuri	B	FB	B	B
6	Crestături	B	B	FB	B
7	Exces de pătrundere	X	X	FB	B
8	Subțiere	X	X	FB	S

Metodele radiografice asigură rezultate mai sigure la interpretarea naturii defectelor, dar se pretează numai în foarte mică măsură la determinarea extinderii în profunzime a defectului. Metodele de control cu ultrasunete permit determinarea mărimii defectului, în schimb sunt mai puțin edificatoare în privința stabilirii naturii defectului. În ce privește forma și orientarea defectelor, metoda radiografică este mai sensibilă la decelarea defectelor volumice mici. Defectele plane pot fi însă identificate radiografic numai dacă se situează în planuri favorabil orientate față de direcția de iradiere și anume, foarte apropiate de direcția de iradiere. Dimpotrivă, la controlul cu ultrasunete, se obține o rezoluție optimă a controlului în cazul defectelor plane cvasi-perpendiculare pe direcția de propagare a fasciculului și un grad redus de detectabilitate în cazul defectelor plane situate pe direcția de propagare a fasciculului de unde. S-a putut constata în general că probabilitatea de detectare a defectelor cu radiații penetrante este mai mare decât cea cu ultrasunete la grosimi sub 20 mm și invers.

8. PRIORITĂȚI ÎN DISPUNEREA ZONEI DE EXAMINARE

Localizarea judicioasă a controlului într-o piesă sau construcție este hotărâtoare, pe de o parte pentru fiabilitatea produsului, iar pe de altă parte pentru eficiența acestuia. Altfel

exprimat, problema care se pune este de a dirija examinarea pe cât posibil spre acele părți sau zone din piesă, unde probabilitatea de producere sau de dezvoltare ulterioară a imperfecțiunilor este maximă. Probabilitatea cumulată de deteriorare depinde în esență de trei factori: factori de fabricație, factori de exploatare și factori de solicitare generală reflectați prin proiectare.

Din punctul de vedere al probabilității de formare și de localizare a imperfecțiunilor în procesul de fabricație, zonele din piesă (ansamblu), care se recomandă a fi luate în considerație pentru examinare nedistructivă sunt:

- zona pereților de grosime minimă;
- zona colțurilor și trecerilor de secțiune la piesele turnate și forjate;
- muchiile pieselor și zona modificărilor bruște de grosime susceptibile de fisurare la tratamente termice;
- îmbinările sudate executate în poziții dificile la montaj;
- îmbinările sudate de colț.

Din punctul de vedere al probabilității de amorsare și de propagare a discontinuităților în cursul funcționării, se recomandă ca examinarea să prevaleze:

- în zonele specifice concentrării locale de tensiune, determinate de modificări de formă;
- în zonele de contact aflate la interfața tranziției între starea lichidă și starea gazoasă a mediilor de lucru;
- în zonele colțurilor și suprafețelor de mare curbura unde fenomenele de eroziune și de coroziune se manifestă mai pregnant;
- suprafețele de contact cu medii corozive ale unor materiale cu pronunțată tendință la coroziune fisurantă sub tensiune.

Considerarea factorului de solicitare este importantă mai ales pentru structura și subansamblele mai complexe. Din acest punct de vedere se recomandă ca examinarea să fie concentrată:

- în zonele supuse la solicitarea de întindere, inclusiv la îmbinările sudate din părțile întinse ale subansamblului;
- la îmbinările sudate meridionale, dirijate pe direcția generatoarei recipientelor sub presiune;
- în zona de intersectare (suprapunere) a două îmbinări sudate;
- în zona rădăcinii cusăturii și în zone aflate sub dublă influență termică, ca de exemplu la îmbinările sudate ale corpurilor și pieselor placate și/sau încărcate cu sudură;
- la îmbinările sudate de colț, în special a celor solicitate la întindere sau forfecare și încovoiere.

BIBLIOGRAFIE

A. Cărți și reviste

1. Aasen, K.: Doc IIS/IIW 225 - 62 - OE;
2. Angres, J., Doc IIS/IIW V 372-67 - OF;

3. Angres, J., Doc IIS/IIW V 425-69 - OF;
4. Argyris J.H., Radaj, D., Konstruktion vol. 23 (1971) nr. 5, p. 179 - 181;
5. x x x, Atlas international al defectelor de turnare, Ed. Tehnică, Bucuresti, 1977;
6. Atzori, B., Dattoma, V., Rivista italiana della saldatura, vol. 29 (1977) nr. 4, p. 187 - 196;
7. Barr, R.R. și colab., Metal Construction, 1975, nr. 12, p. 604 - 625;
8. Bernard, G. și colab, Doc IIS/II W IX 930-75;
9. Biskup J.T., Proc. of the Second Conf. Significance of defects în welds, London, 1968. The Welding Institute 1969, p. 25 - 30;
10. Blauel, J.G., DVS-Berichte Bd. 133, DVS-Verlag GmbH, 1989;
11. Blauel, J.G., DVS - Berichte Band 133, S. 143/49. Deutscher Verlag für Schweisstechnik DVS - Verlag, Düsseldorf 1991;
12. Blauel, J.G., s.a., IAEA Report, 1992;
13. Blauel, J.G., Materialprüfung vol. 34 (1992) nr. 2, p. 48 - 51;
14. Boulton C.F., Doc IIS/IIW XIII 849 - 77;
15. Bramat M.J., Doucet P., Soudage et techniques connexes, 1977, nr. 9/10, p. 331 - 350;
16. Burdekin, F.M. și colab., The effect of weld defects with special reference to BWRA research. Welding Institute Research Bulletin, Abington Hall, 1967;
17. Burdekin F.M., Dawes M.G., Conference Institut of mechanical engineers, London, 1971, p. 28 - 37;
18. Carlsson A.J., Second Inst. Conf. on pressure vessel technology, Part. II, p. 1105 - 1111;
19. Chaveau, B., Soudage et techniques connexes nr. 1/2, 1991, p. 38/49;
20. Cioclov D., Rezistentă și fiabilitate la sollicitări variabile, Ed. Facla, Timisoara, 1975;
21. Cioclov, D., Mecanica ruperii materialelor, Ed. Academiei RSR, Bucuresti, 1977;
22. Cioclov, D., Sudura vol. 2 (1992) nr. 3, p. 22 - 28;
23. Cioclov, D., BID - ISIM, vol. 7 (1998) nr. 2, p. 5 - 11;
24. Dennin, G., Schweissen und Schneiden, vol. 28 (1976), nr. 10, p. 391 - 393;
25. Djubinski, J., Adamiec, P., Schweissen und Schneiden, vol. 45 (1993), nr. 7, p. 361 - 363;
26. x x x , Doc IIS/IIW XIII 514 - 68;
27. x x x, Doc. IIS/IIW V 416 - 69;
28. x x x, Doc IIS/IIW V 420 - 69;
29. x x x, Doc IIS/IIW V 439 - 70;
30. x x x. Doc IIS/IIW V 479 - 71;
31. x x x, Doc IIS/IIW V 485 - 72;
32. x x x. Doc IIS/IIW IX 832 73;
33. x x x. Doc IIS/IIW X 749 - 74;
34. x x x, Doc IIS/IIW IX 872 - 74;
35. x x x, Doc IIS/IIW X111 892-78,
36. Dubresson, J., Souder nr. 6, 1988, p. 331 /37;

37. Dubresson, J., Souder nr. 1, 1989, p. 15/22;
38. Dubresson, J., Souder nr. 3, 1989, p. 5/16;
39. Dubresson, J., Soudage et techniques connexes ur. 1/2, 1991, p. 57/74;
40. Dubresson, J., Soudage et techniques connexes, 1989, nr. 5/6, p. 57 74;
41. Eiro, O., Schweissttechnik vol. 19 (1969) nr. 10, p. 461 - 465;
42. Ferusic S., Materialprül'ung, vol. R (1966) nr. 2, p. 66 - 68;
43. Ferusic S., Materialprül'ung. vo. 8 (1966) nr. 9, p. 331 - 334;
44. Ferusic, S, Schweissttechnik vol. 9 (1969) nr. I I, p. 509 - 5 I6:
45. Fischer, K.H., Schweissverbindungen zerstörungsfrei geprüft DVS-Verlag, 1990
46. Frielinghaus, R., Welding, International Coni'erence 1974, volume 1, paper 18, p. 92/97;
47. Garcia - Martin, Z., Falco, F.C., Welding Research Aproach, vol. 5 (1959), nr.

48. Girenko, V.S., Deinega, V.D., Hololeev, A.M., Probiemî procinosti, 1971, nr. I 1, p. 16- 22:
49. Goebbels. K., Blauel, J.G., V-th conference of NDT Evaluation în the Nuclear Industry, San Diego 1982. ASM, Ohio 1983, p. 237/42;
50. Granjon, H., Doc IIS/IIW IX 748 .- 71;
- 5 1. Granström, A., Doc 11SillW IX 1086 - 78;
52. Gumcy, T.R., Trepka, LN., British Welding Journal 1959, nr. 10, p. 491 - 497;
53. Gurney, T.R ., British Welding Journal vol. 9 (1962), nr. 1 1, p.614 - 620;
54. Gurney, T.R., British Welding Journal vol. 1 I (1964), nr. 1 I, p.593 - 603;
55. Gurney, T.R., Smith, G.C., British Welding Journal vol. I 4 (1967), nr. 1, p.17 - 38;
56. Gumey, T.R., Fatigue of welded structures. Cambridge at the University Press 1968:
57. Guyot F şi colab., Doc IISillW V 333-66/OF;
58. Guyot, F., Martelee, J., CRIF Brussels Report nr. MT 53, 1970, June;
59. Gozi, I.S., Josevici, I.S., Gaidamaka, A.V., Avtomaticeskaia svarka, 1979, nr. 6. p. 5 - 7;
60. 1laibach, E., Oliver, R., Ritter, W., Schweissen und Scheinden, vol. 30 (1978), nr. I1, p.442- 446:
61. Hanel, J.J., DVS- Berichte Band 131, s. 126/31, DVS .- Verlag, Düsseldorf 1990;
62. Harrison, J.D., Smith, G.S., British Welding Journal vol. 14 (1967), nr. 9, p. 493 - 502;
63. Harrison, J.D., Burdekin, F.M., Young, I.G., Second Conf. on the Significance ofdefects în welds Welding institute London 1968;
64. I larrison, J.D., Burdekin, F M., Young, I.G., Proc. of the Second Conf. on the Significance of defects în welds Welding Institute 1969, p. 65 - 79;

65. Harrison, J.D., Fracture, Proc. of the Second Intern. Conf. on Fracture, Brighton, Chapman and Hall, 1969;
66. Harrison, J.D., The Welding Institute Abington Misc 26:3 (1971);
67. Harrison, J.D., Soudage et techniques connexes, vol. 25 (1971), nr. 1/2, p. 69 - 78;
68. Harrison, J.D., Doc. IIS/IIW V 480-71/OE;
69. Harrison, J.D. Doc. HS/HW XHI A - 2 - 72;
70. Harrison, J.D., Doherty, J., Doc. (IS/IIW XIII 848-77;
71. Harrison, J.D., Metal Construction, volume 4, nr. 3 and nr. 7, 1972, p. 99/103 and p. 262/68;
72. Elartrnann, A.J. și colab., Illinois Univ. Structural Research Seric ar. 275 (1963) December;
73. Hasehe, S. și colab.. Doc. IIS/II W IX 839-73;
74. Hempel, M., Stahl und Eisen, vol. 58 (1938), p. 756 - 760;
75. Hobbacher, A., Bul. Ini' Docum, ISIM Timisoara nr. I/2002.p9-20
76. Ilodulak, L. s.a.. Fatigue Fracture Engineering Materials Structures vol. 15 (1992) nr. 3, p. 277 289;
77. Homes. G.A., Arcos, vol. 15 (1938) nr. 89, p. 1951 - 67;
78. Ilöhne, K.J., H. de Boer, Der Stahlbau. 1976. nr. 3, p. 73 - 82;
79. Hrivnak, I., Doc. IIS/IIW IX 11 19-79;
80. Isaksson, G., Johansson, B.G., Proc. of the Second Conf. Significance of defects in welds, London, 1968, The Welding Institute. 1969, p. 59 - 63;
81. Ishii, Y., Kihara, H., Tada, Y., Doc. IIS/IIW XIII 466-67;
82. Ishii, Y., Fujii, T., Doc. IIS/HW V 4 I I-69/OE;
83. Ishii, Y., Iida, K., Doc. HS/HW XIn 560-69;
84. Ito, K.; Bessyo, K., Journal of Japanese Welding Society, vol. 37 (1968) nr. 9, p. 983 991;
85. Izdinsky, O., Proc. of the Second Conf. Significance of defects in welds, London, 1968. The Welding Institute, 1969. p. 39 - 45;
86. Izdinsky, O Schweisstechnik, vol. 22 (1972), nr. 10;
87. Izdinsky, O ZIS Mitteilungen vol. 21 (1979), nr. 3, p. 306 315;
88. Jackwitz, H Müller, G.. Schweisstechnik, vol. 15 (1965). nr. 12, p. 549 - 552;
89. Kanazawa, S. și colab., Doc. IIS/II W IX 840 - 73;
90. Keller, H., Klein, E, Schiff und Werft. 1943, 17/18, p. 257 - 261;
91. Kihara, H. și colab.. Inst. Mech. [ing.. London. May 1971, p. 183 - 89;
92. Kirian, V.L., Girenko, V. S., Avtomaticheskaya svarka, 1976, nr. 7, p. 30 - 34;
93. Kreier, P. colab.. Jahrestagung 1989, DGZIP. Berlin 1990, s. 497/506;
94. Lauch, C., Schweisstechnik, vol. 12 (1962), nr. 8, p. 339 - 341;
95. Leemans, D., Il Giornale delle Prove non Distruttive nr. 1, 1989. s. 59 - 60;
96. Lombardini, J, Izvaranie, vol. 28 (1979) nr. 6/7, p. 183 - 189;
97. Makarov, L.I., Svarac inoe proizvodstvo, 1977, nr. 4, p. 5 - 7;
98. Maddox, S.J., Welding Research International, vol. 4 (1974), nr. 1;
99. Masi, O, Eita, A., Iai metalurgia italiana, vol. 45 (1953) nr. 8, p. 273 283;

100. Matsumoto. J. și colab, Doc IIS/IIW X11T 879-78;
101. Meyer, J., Proc. of the Second conf. Significance of defects în welds, London, 1968. The Welding institute, 1969, p. 15 - 24;
102. Michcev, P.P., Babaev, A.W., Kuzmenko, A.Z., Schweisstechnik, vol. 28 (1978),nr. 11,p.506 -509;
103. Miki, C., Le soudage dans le monde, vol. 27 (1989), nr. 9/10, p. 249 - 267;
104. Million, A., Constantinescu, N., Doc. I I S/ II W V 339 - 66/OF;
105. Mocanu, D., Polihovici, V., Comunicarile conferentei a VI-a de suduru si încercări de materiale, Timisoara. 1969, vol. III, p. 27 - 39;
106. Mudge, P.J.. Garwod. S..I., Welding and Metal Fabrication, I 990, nr. 10, p. 437 - 445;
107. Müller, A.W.E., Archiv für das Eisenhüttenwesen vol. 12 (1938), p. 25;
108. Münener, L, Polak, P., Piuissi, V., Engineering fracture mechanics vol. 4 (1972), p. 695 - 704;
109. Nădăsan, St. și colab., Oboseala metalelor, Ed. Tehnică, Bucuresti, I 962;
110. Neumann, A., Schweissen und Schneiden 45 (1993), H. 10, s. 552/59;
111. Newman, R.P., Gurney, T.R., British Welding Journal vol. 6 (1959), nr. 12, p. 569 -- 594;
112. Newman, R.P., Gurney, T.R., British Welding Journal vol. I] (1964), nr. 11, p. 593 - 603;
113. Nichols, R.W., Le soudage dans le monde, vol. 7 (1969), nr. 4, p. 245 - 261;
114. Orlov. B și colab., IControlî tocecinoi i rolukovoi olcktrosvarL Masino-stroenie, Moscova, 1973, cp. 2;
115. Otto, J., Böhme, D., ., Schweissen und Scheinden, vol. 31 (1979), nr. 4, p. 141 - 143;
116. Paris, P.C., 10-th Sagamore Army Materials Research Conference, Fatigue an interdisciplinary approach;
117. Paris, P.C., Erdogan, F., ASME Winter annual meeting. Paper 62-WA-23Q, 1962;
118. Pohle, C., Zerstörende Werkstoffprüfung în der Schweisstechnik. Fachbuchreihe Schweisstechnik Band 103. Deutscher Verlag für Schweisstechnik DVS - Verlag, Düsseldorf 1990;
119. Richter,E.,Cottin,D.,Schweisstechnik,vol. I9(1969),nr.7,p.320..322;
120. Rolfe, S.T, international metallurgical reviews vol 19 (1974), nr. 186, p. 186 - 198;
121. Ros, M., Branderberger: EMPA - Bericht nr. 122;
122. Satia. V., Varga, L., Studii și cercetări de metalurgie, Academia RSR, vol. 16 (1971),nr.2. p.201 -207;
123. Sana, V., Schultz, T., Arghiriade, I- Sudura și încercări de materiale, 1980, nr. 1, p. 8 - 16;
124. Safta. V., Bernath. A., Moisă, T., Advances în research on the strength and fracture of materials. Pergamon Press, New York, 1978, vol. 3B;
125. Safta, V., Schultz, T., Arghiriade, I., Fracture - 1CF - 5, Cannes 1981, Proc. of

- the 5-th int. Conf. on Fracture, Pergamon Press vol..4, p. 1815 - 1822;
126. Sana, V., Moisă, T.. Simp. int, Admisibilitatea defectelor în construcțiile sudale, Timisoara. act. - nov. 1980;
127. Safta, V.. Filip, I., Simp. int. Admisibilitatea defectelor în construcțiile sudate Timisoara, oct. - nov. 1980;
128. Safta, V., Proc. of the 5-th Conference of Fracture, Cannes 1981, Pergamon Press, volume 4, p. 1815/22;
129. Safta, V., Einnuss der Unregelmässigkeiten auf die Festigkeit der Schweissverbindungen (in rumänisch). OI-D-SID39, Bucuresti, 1984;
130. Safta, V., Safta, V. jr., 98 Jahrbuch -. Schweisstechnik, p. 273 - 286, DVS - Verlag Düsseldorf, 1998;
131. Safta, V., Fogarassy, P., MPA - Seminar "Safety and Reliability of Plant Technology", Stuttgart, [1996, nr. 29;
132. Safta, V., Fogarassy, P., [n Mathematical Modelling of Weld Phenomena, vol. 4, Ed. by H. Cerjak, Institut of Materials Graz, 1998, Sect. VIII, p. 1 - 6;
133. Sana, V., Fogarassy, P., Sudura vol. 5(1995), nr. 3, p. 8 - 15;
134. Schönherr, W., Doc. IIS/IW IX 1142-79;
135. Shemtschushpikov, G.W., Kotenko, E.W., Girenko, W.S., Schweisstechnik vol. 19 (1969) nr. 11, p. 517 - 520;
136. Suzuki, H., Doc. IIS/IW IX 1074-78;
137. Trufiakov, V.I. și colab., Avtomaticheskaya Svarka, vol. 19 (1966), nr. 11, p. 1 - 6;
138. Tutschkiy, G., Schweisstechnik, vol. 28 (1978), nr. 6, p. 270 - 272;
139. Valaire, B., Soudage et techniques connexes, 1992, nr. 11/12, p. 38 - 41;
140. Varga, T., Revue technique Sulzer, 1973, nr. 1, p. 16 - 28;
141. Wallmann, K., Archiv für das Eisenhüttenwesen 1934/1935, nr. 8, p. 243 - 247;
142. Watanabe, I.M., Kamachi, K., Japan Welding Journal, vol. 30 (1961), nr. 6, p. 376-386;
143. x x x , Welding în the World vol 7 (1969) nr. 4, p. 212 - 238;
144. x x x , Welding în the World vol. 7 (1969) nr. 5, p. 313 - 315;
145. x x x , Welding Review Int., August 1991;
146. Wilson, W.M. și colab, Univ. Illinois EES Bulletin nr. 344 (1943);
147. Wilson, W.M., Munse, W.H., Snyder, I.S., Illinois Univ. Exp. Sta. Bull, vol 384, 1950 March;
148. Zainnullin, R.S. și colab., Svarocinoe proizvodstvo 1979, nr. 1 t, p. 4 - 6;
149. Zielhe.. ÉI., Schweisstechnik, vol. 19 (1969), nr. 10, p. 466 - 473;
150. Zimmerman, J.E., Munse, W.H., Illinois Univ. Structural Research Series nr. 252 (1962) July;
151. Yamaguchi, I., Terada, Y., Nitta, A., Doc. IIS/HW XIII 425 - 66
152. Yamato, K., Inoue, T., Nippon Steel Technical Report, Overseas, 1977, nr. 9, p. 16-26;

B.Normegi.vtandarde

153. ASME - Boiler and pressure Vessels Code section III, 1987, Ap. G., Tab. W.G.;
154. AWS, D2.0-96, Specification for welded highway and railway bridge;
155. *** American Welding Society, D1.1, 2000;
156. ASTM-E 1030-84, Metallic castings;
157. ASTM-E 155-85, Reference radiographs for aluminium castings;
158. Bureau Veritas NJ 154-MB4-68. Condition techniques concernant les couves et caissons du reacteur des naviers nucleaire;
159. BSI-PD 6493-91. Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints;
160. *** Druckgetässe, Kranc - UDT WO/W - 1 I/90;
161. DVS Catalogue of acceptance criteria. Röntgenkatalog. EN25817/ISO5817 DVS . Vedag GmbH;
162. EN 1369-96, Founding. Magnetic particle inspection;
163. EN 1371-97, Founding. Liquid penetrant inspection;
164. EN 12454-97, Founding. Visual examination of surface discontinuities;
165. EN 12680-1-96, Founding. Ultrasonic inspection. Steel castings;
166. EN 12680-2-96, Founding. Ultrasonic inspection. Spheroidal graphite cast iron castings;
167. EN 12681-96, Founding. Radiographic inspection
168. EN 258 17-92, Acceptance criteria for butt and fillet welds;
169. Germanischer Lloyd 1976, cap. 1, 2: Vorschriften für die Klassifikation und den Bau von stählernen Seeschiffen;
170. ISO-TC 44, SC 10-80, Guidance on some methods for the derivation of acceptance levels for defects in fusion welded joints;
171. ISO 9915-92, Aluminium alloy castings;
172. ISO 5817/DIN EN 25817 (1992), Lichtbogenschweisverbindungen an Stahl: Richtlinie für die Bewertungsgruppen von Unregelmäßigkeiten. Beuth Verlag, Berlin;
173. ISO 9916-91 - Pièces moulées en alliages d'aluminium et de magnésium. Contrôle par ressuage;
174. ISO/DIS-4992-92, Pièces moulées en acier. Contrôle par ultrasons;
175. ISO 4986-92, Pièces moulées en acier. Contrôle par magnétoscopie;
176. ISO 4987-92, Pièces moulées en acier. Contrôle par ressuage;
177. ISO/WD 15708-1-96, NDT - Radiation Methods - Computed Tomography, Part I. Principles;
178. ISO/CD 15708-2-99, NDT Radiation Methods. Computed Tomography, Part. 2. Examination Practices;
179. *** Merkblatt DVS 0703 (09.93), Bewertung von Stumpf- und Kehinähten

nach EN 25817/ISO5817;

180. ***, P.N. 77/30431;

18L Stahl - Eisen Lieferbedingungen 096/84: Blech, Band, Brei111achstahl mit verbesserten Eigenschaften für Beanspruchung senkrecht zur Erzeugnisssoberfläche;

182. SR-EN 30042-96, imbinari sudate cu arc electric de aluminiu și aliaje sudabile ale acestuia;

183. SR-EN 26520-20, ClasiGcarea imperfecțiunilor din sudurile prin topire ale metalelor:

184. STAS 735-87, Notarea procedeeelor de verificare nedistructivă a imbinărilor sudate;