

CAPITOLUL 1

MECANICA RUPERII - SCURT ISTORIC

-
- 1.1. *Introducere*
 - 1.2. *Revoluția industrială*
 - 1.3. *Încercarea probelor cu creștătură*
 - 1.4. *Începuturile Mecanicii Ruperii Analitice*
 - 1.5. *Dislocații și plasticitate*
 - 1.6. *Recunoașterea disciplinei "Mecanica ruperii"*
 - 1.7. *Standardizarea în domeniul Mecanicii ruperii*
 - 1.8. *Mecanica ruperii bazată pe conceptul de oboseală*
 - 1.9. *Înfluența condițiilor de mediu asupra fisurării*
 - 1.10. *Deformația plastică la vârful fisurii*
 - 1.11. *Fluajul și ruperea vâsco-elastică*
 - 1.12. *Standardizarea încercărilor la rupere*
 - 1.13. *Concluzii*
-

1.1. Introducere

În cadrul acestui capitol este prezentată o scurtă istorie a cercetărilor în domeniul ruperii, momente din evoluția Mecanicii ruperii precum și preocupările cercetătorilor din domeniu.

Metodele de rupere au fost utilizate încă din neolitic atunci când omul a inventat și confecționat unelte simple din piatră ca apoi acestea să devină din ce în ce mai sofisticate. Este evident faptul că precursorii omului modern nu știau nimic în legătură cu mecanismele de rupere. Totuși, aceștia au dezvoltat tehnici remarcabile de confecționare a uneltelor, *figura 1.1*, care serveau necesităților imediate, [49].

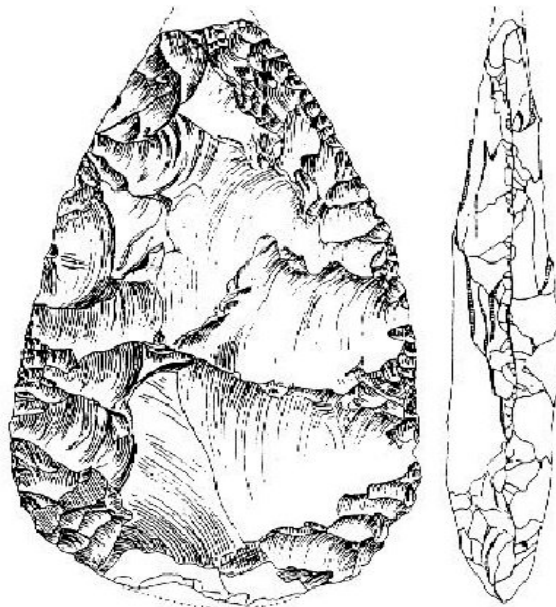


Fig. 1.1. Unealtă neolitică

Anticii cunoșteau faptul că se puteau practica găuri sau canale în oase prin încălzirea diferențiată a acestora. În China antică se utiliza acest procedeu pentru a crea o rețea de fisuri pe o singură fațetă a unei tablete, această rețea beneficiind de o interpretare divină dată de preoții vremii. Pe baza acestor interpretări își bazau împărații deciziile politice. Între anii 1928 și 1937, în câmpul arheologic de la Anyang, provincia Honan, s-a descoperit o adevărată colecție de oase din carapace de broască, datând din vremea dinastiei Sang, la un loc cu adnotările preoților din care se poate deduce puterea lor de divinizare.

În țările vestice primele înregistrări istorice ale studiului rezistenței la rupere se recunosc a fi încercările asupra barelor din fier efectuate de către Leonardo da Vinci (1452-1519). În Codex Atlanticus [51], da Vinci prezintă o schiță cu sistemul de încărcare, *figura 1.2*.

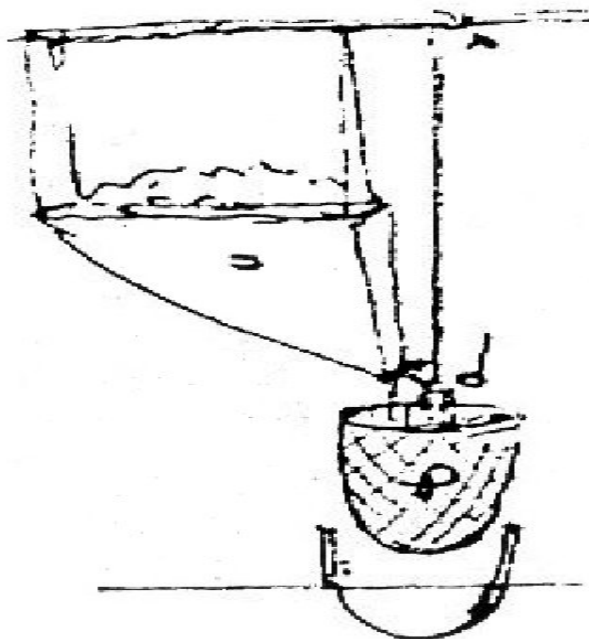


Fig. 1.2. Sistemul lui da Vinci pentru încercarea barelor din fier

În coșul care supune bara la tracțiune curge nisip printr-un orificiu al rezervorului aflat în partea superioară. În momentul în care bara de rupe, curgerea nisipului este oprită prin acoperirea orificiului de către o clapetă acționată cu ajutorul unui arc. Comentariile lui da Vinci furnizează informații adiacente în legătură cu schițele și încercarea propriu-zisă. El notează valoarea greutateii în momentul ruperii barei și zona în care s-a produs ruperea. Scurtează bara, astfel încât să fie la jumătate din lungimea inițială și notează, de asemenea, greutatea la care se rupe, după care scurtează bara la un sfert din lungimea ei inițială și operația se repetă. Aparent, da Vinci a efectuat mai mult decât o simplă încercare. În adnotările sale apare afirmația: *greutatea mai mare corespunde unei lungimi mai mici*. O preocupare aparte o are da Vinci asupra locului în care se produce ruperea, observând foarte bine aspectul zonei în care se produce aceasta. Este clar faptul că experimentele lui da Vinci au pus în evidență efectul defectelor din material asupra rezistenței. Datorită faptului că a utilizat în continuare probe încercate anterior la tracțiune și ca urmare pre-tensionate, nu i-a permis lui da Vinci să observe adevăratul efect al mărimii probei asupra rezistenței la rupere.

În timp ce Leonardo da Vinci s-a concentrat pe fire de lungimi diferite dar având aceeași grosime, Galileo Galilei (1564-1642), [292], a studiat rezistența unor fire de

lungime constantă dar de grosimi diferite. De asemenea, el a mai studiat ruperea între reazeme sau în consolă la încovoiere, *figura 1.3*, sau ruperea coloanelor de marmură solicitate axial. Concluzia la care a ajuns Galilei a fost că rezistența coloanelor depinde numai de aria secțiunii transversale și nu de lungime. Presupunerea lui conduce la ideea similitudinii dimensionale utilizată în proiectarea inginerească de mai târziu.

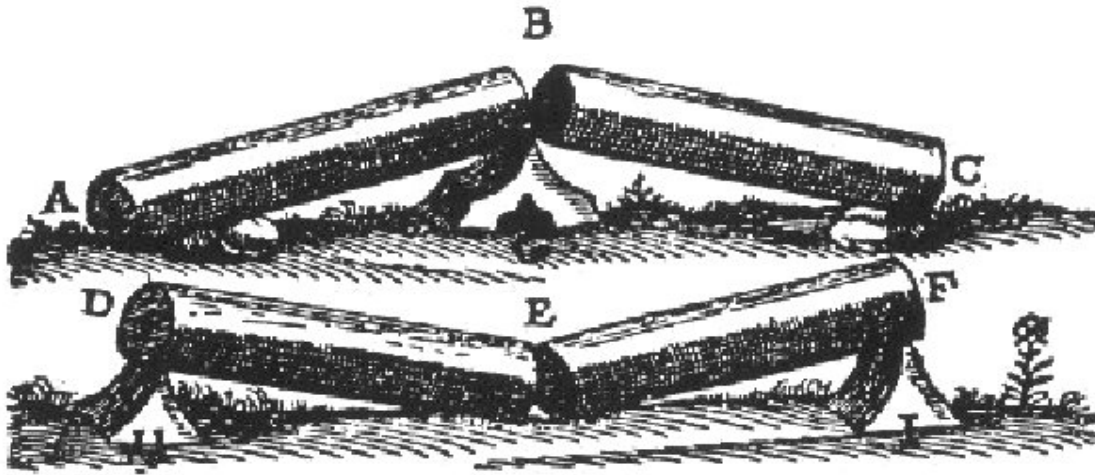


Fig. 1.3. Galileo Galilei: ruperea barelor cu reazem de mijloc și reazeme la capete, 1638

În vederea construirii de fântani cu înălțimi mari la curtea regelui Louis al XIV-lea, specialistul E. Mariotte (1620-1684) a condus teste la deformare și presiune asupra unor conducte cilindrice care trebuiau să lucreze la presiune înaltă [181]. Au fost testate mai multe țevi de diametre diferite, la presiune furnizată de la un rezervor aflat pe vârful unui deal. Mariotte a observat proporționalitatea între presiune și deformarea circumferențială a țevii, *figura 1.4*, observație contemporană cu legea lui Hooke [294].

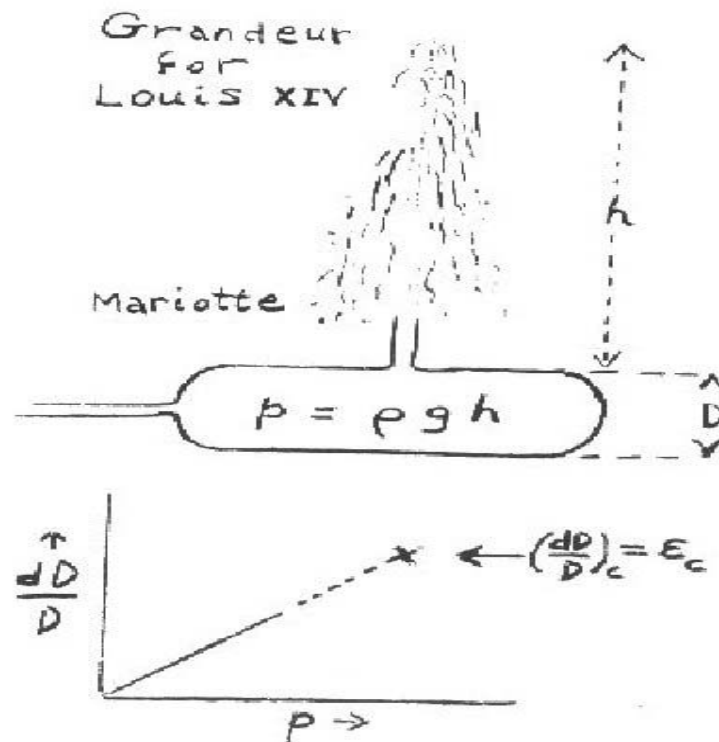


Fig. 1.4. E. Mariotte: Incercarea la presiune a țevelor

Aceste observații ale lui E. Mariotte au fost publicate în Analele Academiei Franceze de Știință, 1786, și au marcat unul dintre primele eforturi de relatare a rezistenței la deformare care a condus la practica folosirii deformății maxime sau tensiunii maxime pentru prezicerea rezistenței la rupere.

În anul 1830 Lloyd nota că rezistența barelor scurte tinde să o depășească pe cea a barelor lungi. Teste independente făcute de Le Blanc în 1839 au demonstrat că firele lungi erau mai slabe decât firele scurte, la același diametru. Slăbirea rezistenței firelor mai lungi a fost pusă pe seama existenței neomogenităților.

1.2. Revoluția industrială

Revoluția industrială din secolul al XIX-lea a condus la o creștere semnificativă a cererii de metale și în special de fier și oțel, pentru utilizarea în fabricile aflate în mare expansiune, în special în a doua jumătate a secolului al XIX-lea. Această puternică expansiune a construcțiilor inginerești a fost acompaniată, din păcate, și de o proporție mai ridicată a distrugerii acestor construcții. De exemplu, ruperea axelor vagoanelor de cale ferată era atât de obișnuită încât în 1870, British Magazine Engineering publica săptămânal statistici în legătură cu accidentele pe calea ferată. Această situație conduce la creșterea îngrijorării și conștientizării publicului călător în legătură cu siguranța pe calea ferată și poduri. Ca rezultat, proiectanții au fost forțați să devină mai preocupați în legătură cu oțelul potrivit pentru anumite aplicații care necesită o anumită acuratețe a determinării proprietăților relevante ale materialelor. S-a constatat că oțelul pentru tunuri fabricat de uzinele Krupp prin anii 1870 devenea fragil, în anumite condiții de prelucrare [133]. Metoda care s-a impus pentru determinarea acestei fragilități a fost încercarea la impact a probelor crestate. Pentru a răspunde preocupărilor inginerilor proiectanți, în Europa s-au înființat un număr mare de laboratoare pentru încercarea materialelor [292]. Unul dintre primele și cele mai notabile laboratoare de încercare a materialelor a fost construit în anul 1865 de către Kikaldy la Londra. Aici funcționau mașini de încercat la tracțiune și oboseală. Prin încărcarea cu ajutorul unui vagon deplasabil se puteau solicita probe cu lungimi diferite, cu dimensiuni ale secțiunii transversale diferite și la sarcini diferite. Se determinau forța maximă, alungirea maximă cât și schimbarea formei probelor supuse solicitărilor.

Presiunea publică asupra necesității unei calități ridicate a materialelor a fost atât de mare încât a fost inventată o șampilă a laboratorului condus de Kikaldy care a fost primul *însemn de calitate* a încercărilor efectuate, *figura 1.5* [292, 275].



Fig. 1.5. Marca privind calitatea încercărilor în cadrul laboratoarelor Kikaldy

Germanii de la uzinele Krupp și-au testat materialele mai întâi în cadrul laboratoarelor Kikaldy, înainte de a-și construi propriile laboratoare. În cadrul laboratoarelor Kikaldy s-a utilizat pe scară largă încercarea la impact a probele crestate. Pe baza acestor teste s-a determinat temperatura de tranziție ductil-fragil la oțeluri.

În 1909, P. Ludwik [175] elaborează teoria care încearcă să explice creșterea relativ abruptă a lucrului mecanic de fisurare pentru proba crestată, cu creșterea temperaturii de încercare. El presupune că oțelul prezintă o anumită rezistență la curgerea plastică, decrescătoare cu temperatura și independentă de rezistența la rupere.

1.3. Încercarea probelor cu creștătură

Teoria lui Ludwik a fost formulată în termenii deformației și tensiunii, astfel încât s-a conchis că trebuiesc aplicate legile similitudinii dimensionale. Experimentele conduse ulterior asupra probelor cu creștătură au demonstrat că argumentul similitudinii nu era întru totul valabil. Primele observații în acest sens au fost făcute în 1921 de către Stanton și Batson de la National Physical Laboratory din Teddington [284]. Solicitând la impact probe cu creștătură fabricate din oțel structural au găsit o descreștere substanțială a lucrului mecanic unitar la probele cu dimensiuni mai mari. S-a concluzionat atunci că energia la rupere este formată din: energia necesară încovoierii barei ca atare – proporțională cu volumul piesei – și lucrul mecanic dezvoltat în cadrul propagării fisurii – proporțional cu aria secțiunii de rupere.

Încercări statice asupra barelor cu creștătură au fost conduse de Docherty [56, 57] în 1930 pentru a elimina influența efectelor dinamice prezente în testele efectuate de Stanton și Batson. După expunerea profesorului Docherty privind aceste teste și spectaculoasa demonstrație a efectului mărimii probei asupra rezistenței acesteia, un editor de la Engineering Journal a scris despre acest test în anul 1935, în care arăta că principiile similitudinii par a fi depășite atunci când apare fisura.

S-a demonstrat foarte curând că ruperea este puternic influențată de concentratorii de tensiune și se poate spune că *istoria distrugerilor este de fapt una a creștăturilor, defectelor, crăpăturilor, găurilor, canelurilor, trecerilor de secțiune, incluziunilor, pittingurilor și altor asemenea concentrări de tensiune ce reprezintă nucleee de la care începe cedarea*. Tot în 1930, G. Sachs și colaboratorii săi efectuează încercări asupra probelor cilindrice cu creștătură și investighează așa-numita *sensibilitate la creștătură* a oțelurilor de înaltă rezistență [255]. Aceste investigații au stabilit efectele adâncimii creștăturii și a razei la vârf a acesteia asupra rezistenței la rupere. S-a arătat în mod clar că, pentru oțelurile înalt rezistente, raza la vârf scăzută a creștăturii are ca efect scăderea rezistenței la rupere. Sachs conchide că în cazul corpurilor supuse deformării plastice limitate, fără fisurare, se pot aplica legile similitudinii dar că aceasta nu mai este valabilă atunci când apare fisura. În acel moment, nu au fost făcute încercări de a înlocui creștătura fabricată artificial cu o fisură reală. În anii 1940, nu era recunoscut faptul că fisurile sau defectele de tip fisură reprezintă factori semnificativi în reducerea capacității de încărcare a structurilor fabricate din oțeluri de înaltă rezistență. În orice caz, testele efectuate de Stanton și Baston și Docherty nu au avut o influență perceptibilă asupra practicii proiectării din acea vreme. În plus, înainte de 1950 nu era obișnuit a se evidenția faptul că fabricația poate induce fisuri în material ce pot fi responsabile pentru distrugere [196]. Toate specificațiile stabileau faptul că fisurile, de orice mărime, nu sunt acceptabile. Când

mărimea fisurii inițiale era ignorată, nu exista posibilitatea de a determina cauza reală a distrugerii care ar fi trebuit distribuită între nivelul tensiunilor, tenacitate și mărimea fisurii inițiale. După anul 1900, odată cu dezvoltarea industriei de automobile și a celei aeronautice, utilizarea în mod adecvat a coeficienților de siguranță este mai dificilă și devine necesar a se înțelege mai bine fenomenul ruperii.

1.4. Inceputurile Mecanicii Ruperii Analitice

Tratarea analitică a mecanicii ruperii a fost făcută în lucrarea lui Wieghardt [252] din 1907 în care s-a încercat determinarea câmpului de tensiuni din jurul fisurii solicitate static în modul mixt de încărcare. Relația găsită a fost:

$$\sigma = r^m G(\theta) \quad (1.1)$$

în care r reprezintă raza la vârful fisurii iar θ este unghiul polar.

De asemenea Wieghardt investighează inițierea fisurii utilizând criteriul tensiunii de tracțiune maximă și criteriul tensiunii tangențiale maximă depinzând de comportarea materialului. Wieghardt stabilește în mod corect următoarele: *„cunoașterea distribuției tensiunii teoretice nu permite cu certitudine evaluarea inițierii fisurii pe baza depășirii încărcării și nu este totdeauna posibil de a determina traseul fisurii”*.

Lucrarea lui Wieghardt a fost publicată într-o obscură revistă germană, care mai târziu a întrerupt publicarea și de aceea, a fost uitată și nu a exercitat, pentru multă vreme, un impact semnificativ asupra dezvoltării Mecanicii ruperii.

Profesorul Inglis a publicat prima lucrare semnificativă și fundamentală asupra tensiunii din imediata vecinătate a unei fisuri eliptice de la care poate fi derivată o fisură reală [117]. Lucrarea apare în anul 1913. În această lucrare Inglis a dezvoltat o soluție teoretică a funcției pentru câmpul tensiunilor în apropierea deschiderii eliptice cu excentricitate oarecare, în plăci solicitate la tracțiune la distanță infinită. În comentariile sale Inglis arată clar că această analiză a fost făcută cu scopul de a înțelege propagarea fisurii în cazul fluctuațiilor solicitării. Rezultatele pot fi utilizate în cazul limită pentru a modela o fisură ca fiind o cavităte eliptică, subțire. Inglis arată că, atunci când axa mică a fisurii tinde spre zero, la vârful fisurii apar deformații plastice, chiar la nivele mici ale solicitărilor. Astfel, Inglis presupune că, și în condițiile în care tensiunea aplicată nu depășește limita de curgere, la vârful fisurii apare o tensiune care duce la ruperea legăturilor făcând ca fisura să-și mărească lungimea, crescând din nou tensiunea de la vârful fisurii, etc. Inglis a furnizat o expresie simplă pentru tensiunea maximă la vârful unei cavități eliptice:

$$\sigma_{\max} = \sigma \left[1 + 2\sqrt{\frac{a}{\rho}} \right] \quad (1.2)$$

în care:

- σ este tensiunea de solicitare;
- a este semilungimea cavității eliptice;
- ρ este raza la vârful cavității.

În 1920 A. A. Griffith, *figura 1.6*, student și colaborator al faimosului profesor G.I. Taylor, a publicat o lucrare privind rezistența la fisurare a materialelor cu componentă din sticlă, lucrare care s-a regăsit și în teza sa de doctorat [101, 102]. Griffith presupune că pe suprafața acestor materiale, se regăsesc, încă din procesul de fabricație,

numeroase mici defecte de tip fisură ce au raza zero la vârf. El presupune că fisura se propagă sub acțiunea solicitării de tracțiune și ca urmare, ruperea va apărea în momentul în care scăderea energiei de deformare pe unitatea de propagare a fisurii devine mai mare decât creșterea energiei superficiale. Ecuațiile pentru viteza de scădere a energiei de deformare elastică au fost obținute pe baza ecuațiilor lui Inglis în care s-a luat valoarea zero pentru raza la vârful fisurii. Lucrarea descrie experimentele suport ale lui Griffith și prezintă măsurători în detaliu ale energiei superficiale pentru un solid fabricat din sticlă. Se utilizează vase sferice cu pereți subțiri, prefisurate și supuse la presiune interioară. Pe baza tensiunii la fisurare astfel obținute s-a putut aprecia pierderea energiei de deformare la propagarea fisurii care a fost de numai 20%, prea mică pentru o înțelegere exactă a fenomenului. Griffith a acordat totuși o importanță prea mare energiei superficiale.



Fig. 1.6. A. A. Griffith (1893-1963)

Lucrarea lui Griffith a fost revizuită de G.I. Taylor și acceptată spre publicare înainte de a se descoperi anumite neglijențe și chiar erori în ecuațiile lui Griffith pentru relațiile dintre tensiunea normală la fisurare și pierderea energiei elastice de deformare la propagarea fisurii. De asemenea, determinările efectuate pentru pereți sferici subțiri au condus la un efect de încovoiere în apropierea flanșelor. Nu s-a ținut seama nici de efectele mediului inconjurător, în special efectul umezelii, asupra propagării fisurii.

Contribuția principală a lui Griffith este reprezentată de relația în care intră tensiunea de fisurare σ_f și mărimea fisurii a :

$$\sigma_f \sqrt{\pi a} = \sqrt{2\gamma_s E} \quad (1.3)$$

în care γ_s reprezintă energia superficială iar E reprezintă modulul de elasticitate longitudinal. Griffith a notat că relația (1.3) este valabilă doar pentru materialele fragile.

După anul 1920 s-a observat o anumită stabilitate a fisurii într-un solid supus la tensiune joasă chiar aflat într-un mediu agresiv. Înainte de 1960, gradul de cunoaștere a încercărilor la rupere nu a dus la o înțelegere clară a lucrării lui Griffith. Ca urmare, interesul asupra lucrării lui Griffith a continuat și după al doilea război mondial când Irwin [124] și Orowan [207] introduc anumite modificări în teoria acestuia.

Determinările experimentale și soluțiile analitice asociate cu rezistența la rupere au fost de un real interes în știință și industrie în Uniunea Sovietică în perioada 1920-1940. Școala matematică de elasticitate și plasticitate condusă de G. V. Kolosov, între care s-au aflat N. I. Muskhelishvili, A. Yu. Ishlinsky, G. N. Savin, S. G. Lekhnitsky, L. A. Galin și alții, a avut o contribuție importantă la soluționarea matematică a problemelor importante de rezistență și rupere [216]. Probleme asociate cu clivajul fisurilor au fost investigate de P. A. Reh binder, Ya. I. Frenkel și V. T. Obreimoff [202].

Pentru ingineri lucrarea cea mai importantă în domeniul ruperii pare să fi fost cea publicată de Stanton și Batson privind încercările la impact asupra probelor cu creștătură [284]. Datorită utilizării pe scară din ce în ce mai largă a acestor tipuri de încercări, a fost pus în funcțiune Laboratorul Național de Fizică din Teddington. S-au încercat aici probe din diferite materiale, de diferite mărimi și cu raze diferite la vârful creștăturii. De asemenea mașinile-pendul utilizate în cadrul încercărilor au fost corespunzătoare diferitelor mărimi ale probelor. Rezultatele acestor încercări au arătat o scădere substanțială a tenacității la fisurare cu creșterea mărimii probelor, atât în termenii apariției ruperii cât și în termenii pierderii energiei pendulului pe unitatea de volum a probei. Participanții la discuțiile pe această temă, nu au furnizat explicații plauzibile privind abaterea de la similitudine în acest caz. Între anii 1930-1935, Docherty a condus un studiu similar referitor la efectul mărimii probei asupra fenomenului de rupere la Colegiul Naval din Greenwich, utilizând încărcarea statică. Un editorialist de la revista Engineering scria că încercările lui Docherty demonstrează restricțiile de la legile similitudinii care au fost utilizate până în acel moment ca bază a modelelor științifice în domeniu. Neuber, în cartea sa din 1937 [196] privind analiza tensiunilor în prezența creștăturilor, arată că deformația plastică la vârful creștăturii produce un efect echivalent cu o creștătură ce are o rază mai mare la vârf. Acest lucru indică faptul că, tensiunea de tracțiune maximă la vârful creștăturii este mai mică decât valoarea ei determinată pe baze exclusiv linear-elastice. O implicație imediată a fost că valoarea zonei deformate plastic din vecinătatea vârfului fisurii este în strânsă legătură cu raza de curbură de aici.

O idee nouă introdusă de Weibull în 1939 [299] atrăgea atenția asupra implicării teoriei statistice în rezolvarea unor necunoscute privind ruperea, în special ruperea fragilă. Weibull considera solidul ca fiind compus din mai multe unități de volum luate individual și care acționează independent pentru a compune rezistența întregului volum care, în mod esențial, cedează în zona în care avem veriga cea mai slabă a modelului înșeriat.

1.5. Dislocații și plasticitate

Între anii 1920-1940, în timp ce înțelegerea mecanismelor ruperii era destul de vagă, au fost introduse conceptele privind dislocațiile și plasticitatea. Înțelegerea mecanismelor dislocației cristaline în anii 1930 și în decadele următoare furnizează idei importante care au fost transferate spre procesul ruperii. Tot în această perioadă au puse în evidență defectele din rețeaua cristalină. Deși rezistența metalelor la curgerea plastică este în general înțeleasă, detaliile rămân complexe, limita de curgere fiind determinată mai degrabă pe bază de experiment decât pe bază de calcul analitic. S-a constatat că, în prezența unei fisuri inițiale, separarea completă a unui solid structural apare la tensiuni mult mai mici decât limita de curgere a respectivului material. În studiul mecanismului dislocației s-a arătat că, forța motrice a acesteia este dată de produsul dintre vectorul Burghers și tensiunea tangențială, paralelă cu planul dislocației.

Lucrarea lui Westergaard din 1939, [308], a fost considerată, pentru foarte mulți ani, de o importanță majoră în mecanica analitică a ruperii. Această lucrare furnizează o metodă relativ simplă pentru determinarea funcției de tensiuni din apropierea flancurilor fisurii aflată într-un solid cu dimensiuni infinite în raport cu cea a fisurii. Deși lucrarea s-a concentrat în a determina presiunile rezultate din contactul Hertzian a două solide, Westergaard observă că această metodă a funcției de tensiuni era capabilă de a modela fisuri într-un solid. În orice caz, metoda Westergaard reprezintă un caz special al funcției generale mai complexe din teoria elasticității bidimensionale, dezvoltată de Kolosov la începutul secolului 20 și extinsă de Muskhelishvili în anii 1930 [193].

1.6. Recunoașterea disciplinei de Mecanica ruperii

După anul 1936, datorită amenințării de război în Europa, a luat amploare reconstruirea flotei navale a Statelor Unite ale Americii. O intensă popularizare a Mecanicii ruperii a avut loc cu ocazia cedării fragile a vasului Liberty. De la abordarea Mecanicii ruperii ca o simplă curiozitate științifică s-a trecut în acel moment la utilizarea ei ca disciplină inginerescă. La începutul războiului navele germane scufundau de trei ori mai multe nave ale aliaților în raport cu posibilitățile de construcție. În acest context, faimosul constructor american Kaiser a promovat o tehnică de construcție rapidă a vaselor. Evident că și defectele apărute au fost pe măsură: la 90 dintre vase au apărut defecte serioase, la 20 de vase au apărut ruperi, iar 10 dintre acestea pur și simplu s-au rupt în două. Investigațiile acestor distrugerii au condus la următoarele concluzii:

- sudurile au fost executate de personal necalificat;
- cele mai multe ruperi au apărut în colțurile trapei de pe punte;
- materialul utilizat pentru construcție a avut o comportare slabă la testul de impact Charpy.

Astfel, anumite vase s-au rupt încă înainte de a intra în luptă. Impactul acestor cedări a fost dezvoltarea oțelului structural, cu îmbunătățiri în ceea ce privește tenacitatea la fisurare și a standardelor privind controlul calității sudurilor. Multe din cercetările efectuate în acest sens au fost promovate de Laboratorul de Cercetare Navală (LCN) din Washington. Când a fost publicat volumul simpozionului intitulat "Fracturarea metalelor" de către Societatea Americană de Metale (ASM) în 1948, W. P. Roop, care se ocupa de organizarea și editarea volumului, a insistat pentru utilizarea termenului de „fracturare” mai degrabă decât cel de „rupere”. În acea vreme, a avut sentimentul că ruperea materialelor structurale trebuie privită mai degrabă ca un „proces” decât ca un „eveniment”. În acest context, fracturarea a fost catalogată ca un proces de propagare progresivă a fisurii: inițierea, propagarea și oprirea acesteia fiind caracteristici măsurabile de un real interes.

Teoria lui Griffith referitoare la rupere a fost modificată de Irwin [122] și Orowan [208]. După Conferința de Mecanică Aplicată de la Paris din 1946, Irwin, care lucra la LCN, l-a vizitat pe Orowan la Universitatea Cambridge. În acel moment, Orowan era preocupat de studiile privind detecția defectelor cu ajutorul radiației X. Referitor la teoria lui Griffith, aceasta o aborda doar pentru aplicațiile academice. Irwin ia în considerație aplicațiile sale practice, atât ca posibilitate cât și ca necesitate. În anul 1953 atenția era îndreptată spre inițierea și controlul propagării fisurii. Fractografia optică arăta că deschiderea și unirea regiunilor separate de la vârful fisurii reprezenta un mecanism comun de propagare a fisurii. În 1954, Post efectuează studii fotoelastice privind distribuția tensiunilor în apropierea vârfului fisurii. Post și Irwin, utilizând lucrarea lui

Westergaard din 1939, prezintă explicații asupra franjelor izocromate de la vârful fisurii. Pentru prima dată în anul 1954 cei doi furnizează un calcul de proiectare a componentelor ce conțin fisuri încă din procesul de fabricație.

În 1956 Irwin dezvoltă o nouă abordare ce derivă din conceptul modificării teoriei lui Griffith. Acest concept presupune că energia necesară pentru crearea de noi suprafețe în timpul propagării fisurii provine de la diminuarea energiei elastice de deformare din întregul solid. Irwin notează termenul care dă cantitatea de energie de deformare relaxată cu G , în onoarea lui Griffith. Irwin stabilește că parametrul G , denumit și „forță” de propagare a fisurii, reprezintă o măsură a intensității câmpului tensiunilor la vârful fisurii, atunci când deformarea plastică este limitată la o mică regiune din imediata vecinătate a vârfului fisurii. Irwin stabilește criteriul G_c ca fiind tenacitatea critică la fisurare și specifică faptul că propagarea apare atunci când G atinge valoarea G_c . Aceste noțiuni inițiale formează baza conceptuală a Mecanicii Linear-Elastice a Ruperii (MLER). S-au desprins trei idei fundamentale:

- mișcarea de înaintare progresivă a frontului fisurii este condusă de suprafețele de la vârful fisurii;

- „forța” de propagare a fisurii G a fost reprezentată de diminuarea energiei elastice de deformare la vârful fisurii raportată la unitatea de extensie a acesteia;

- rezistența la propagarea fisurii a fost definită ca fiind cantitatea de energie disipată în cadrul deformărilor neelastice de la vârful fisurii.

Termenul G_c constituie un criteriu parametric ce trebuie utilizat pentru prezicerea încărcării critice ce conduce la propagarea (instabilă) a fisurii.

În lucrarea din 1957, Irwin utilizează metoda semi-inversă a lui Westergaard în încercarea de a lega G de câmpul tensiunilor de la vârful fisurii. Această analiză complexă a fost făcută de Westergaard în 1937 și a atras atenția grupului care lucra la LCN. Când Westergaard a prezentat lucrarea lui Eriksen i-a venit ideea de a furniza funcția de tensiune în cazul solicitării fisurii de două forțe paralele cu flancurile acesteia. Pe această bază Irwin a reușit să găsească o relație între energia elastică de deformare relaxată ca urmare a propagării fisurii și factorul de intensitate a tensiunii:

$$K^2 = G \cdot E \quad (1.4)$$

Irwin a sugerat determinarea lui G cu ajutorul mărcilor tensometrice însă metoda nu a fost utilizată în practică timp de 30 de ani datorită dificultăților tehnologice și datorită anumitor incertitudini privind efectele gradientului tensiunilor. Astfel, a fost dezvoltată o metodă alternativă, respectiv determinarea lui G prin intermediul complianței. În 1958 Irwin publică o lucrare privitoare la stadiul atins în dezvoltarea Mecanicii ruperii. În această lucrare sunt cuprinse expresii convenționale pentru tensiunile și deplasările din apropierea vârfului fisurii în cazul celor trei moduri fundamentale de solicitare. Au fost abordate atât aspectele teoretice cât și cele experimentale. Respectivul articol a fost utilizat de multe ori ca suport de curs în domeniul Mecanicii ruperii, atât în S.U.A. cât și în Europa.

Dat fiind faptul că G și K devin parametri importanți la vârful fisurii, se încearcă a se lega tensiunile, deformările și deplasările de la vârful fisurii, de acești parametri. Anumite lucrări aparute în perioada 1945-1952 au prezentat distribuția tridimensională a tensiunilor în vecinătatea fisurilor aflate în corpuri infinite supuse diferitelor condiții de solicitare. Datorită condițiilor de contur relativ simple, au fost obținute soluții satisfăcătoare pentru aceste probleme. Soluțiile pentru distribuția tensiunilor au fost, în cea mai mare parte, extinderi ale teoriei elasticității liniare derivată prin utilizarea tehnicilor complexe privind funcția de tensiuni. În timp ce rezultatele privind distribuția

tensiunilor au apărut înaintea datelor privitoare la mecanica ruperii, semnificația practică a acestor soluții a fost pusă în evidență după introducerea parametrilor G și K .

Se cunoaște în prezent faptul că, în timpul fabricației, se introduc microdefecte de diferite forme și dimensiuni. Ca urmare, este de înțeles de ce anumite construcții sudate cum ar fi podurile sau vasele sub presiune nu cedează sub solicitare întreaga perioadă de funcționare iar pe de altă parte este la fel de bine înțeles de ce în anumite structuri are loc propagarea fisurii până la cedarea acestora. În timpul dezvoltării timpurii a Mecanicii ruperii această abordare nu a fost acceptată. Cei mai mulți ingineri preferau să se bazeze pe indicația „*fără fisuri*” inclusă în specificațiile de material. Pe de altă parte se recunoștea faptul că, un calcul cu siguranță ridicată trebuie să ia în considerare cel puțin defectele de o anumită mărime.

Cu toate noile abordări și tehnologii din anii 1950, reacția la Mecanica ruperii de către comunitatea inginerească a fost una sceptic-dezinteresată.

Au existat trei cazuri istorice de cedare ce au condus la o îndreptare a atenției către disciplina Mecanica ruperii. Aceste evenimente au fost: ruperea la mare altitudine în anul 1955 a avionului cu reacție de tip Havilland Comet, ruperea mai multor componente aflate în mișcare de rotație ale turbinelor de la generatoarele electrice între anii 1955-1956, cedarea camerelor de ardere de la rachetele Polaris și Minuteman în anul 1957.

1.7. Standardizarea în domeniul Mecanicii ruperii

Cedarea camerelor de ardere a rachetelor menționate îndeamnă Biroul Secretariatului de Stat al Apărării din S.U.A. de a cere asistență de la ASTM. În acest context s-au făcut unele cercetări iar ASTM a prezentat un raport în anul 1960 din care reiese faptul că principiile Mecanicii ruperii au fost destul de bine înțelese pentru a permite utilizarea lor atât în încercările la rupere cât și în interpretarea rezultatelor [2, 3, 4, 5]. Metodele Mecanicii ruperii au fost recunoscute ca ghid în proiectare pentru a preveni cedarea în serviciu. În raportul ASTM comportarea la rupere a fost legată de parametrul K ce reprezintă expresia câmpului tensiunii la vârful fisurii. Raportul recunoaște necesitatea a două tipuri de încercări:

1. O încercare pentru măsurarea cantitativă a tenacității la fisurare în vederea furnizării de date care să fie utilizate în proiectarea structurală;
2. Impunerea unui test simplu care să poată ordona tenacitatea la fisurare în funcție de materialele încercate.

Publicarea acestui raport a contribuit în mod semnificativ la acceptarea Mecanicii ruperii ca disciplină utilă în proiectare.

ASTM a formulat patru rapoarte adiționale între anii 1961-1964 [2, 3, 4, 5, 6]. Al doilea, al treilea și al patrulea raport furnizează clarificări și concepte îmbunătățite față de cele prezentate în primul raport. Al cincilea raport descrie metode de încercare incluzând recomandări pentru încercarea la oboseală a probelor cu creștătură la viteze mici de încercare. În al cincilea raport se mai descriu:

- diferite forme de fisuri ce se regăsesc în structurile fabricate;
- metode pentru măsurarea lungimii critice de fisurare;
- metode pentru evaluarea creșterii subcritice a fisurii cauzată de fluctuațiile solicitării și de efectele mediului înconjurător sub încărcare statică;
- criteriu de fisurare înainte de rupere pentru containerele presurizate;
- metode pentru estimarea duratei de viață a materialelor structurale.

Acest raport reflectă activitățile de cercetare semnificative și dezvoltarea rapidă a tehnicii apărute înainte de 1960. S-a ajuns la concluzia că, atenția în cadrul încercărilor la rupere trebuie focalizată pe caracterizarea și prezicerea condițiilor care controlează propagarea progresivă a fisurii. Cum înainte de 1950 ruperile structurale erau întâmplătoare, accentul cădea pe repararea distrugerilor provocate de acestea. Cauza distrugerilor era distribuită între tensiunea prea mare, materialul prea fragil, anumite considerații asupra ansamblului defectelor, etc. În anii '50, echipamentele pentru detecția defectelor era de o acuratețe limitată iar inspecțiile care să aibe un oarecare succes erau destul de scumpe. Utilizând mărimile specifice Mecanicii ruperii se putea scăpa de o parte din aceste dificultăți prin asumarea unei mărimi credibile pentru ansamblul defectelor și prin calculul încărcării de siguranță la propagarea fisurii. În acest context, se putea prezice pericolul reprezentat de un singur defect sau de un grup de defecte prin utilizarea conceptelor mecanicii ruperii.

Începând din anul 1970, incertitudinile legate de o serie de concepte cum ar fi startul și propagarea fisurii, oprirea fisurii, etc. au condus la o anumită confuzie care a fost în detrimentul acceptării generale a conceptelor Mecanicii ruperii în industrie pentru includerea acestora în cadrul recomandărilor de proiectare. După un efort considerabil, Comitetul pentru Nomenclatură condus de Irwin a furnizat prima listă cu terminologia în domeniul Mecanicii ruperii publicată în *Annual Book of Standards* (1978)

Extensii ale Mecanicii ruperii linear-elastice încep să apară în literatura de specialitate începând cu anul 1960. Primele patru, cele mai notabile, sunt:

1. Propagarea fisurii de oboseală;
2. Fisurarea corozivă sub tensiune;
3. Efectele plasticității la vârful fisurii;
4. Fluajul și ruperea vâsco-elastică.

1.8. Mecanica ruperii bazată pe conceptul de oboseală

Prima lucrare referitoare la propagarea fisurii prin oboseală a fost publicată de Paris [222], *figura 1.7*, Gomez și Anderson în 1961.



Fig. 1.7. P. C. Paris

Autorii cunoșteau bine lucrările lui Irwin și ca urmare au legat propagarea fisurii prin oboseală de factorul de intensitate a tensiunii, K . Autorii recunosc faptul că tensiunile și deformațiile din apropierea vârfului fisurii sunt reprezentate de K_{\max} și β ($\beta = K_{\max} / K_{\min}$)

și au stabilit că propagarea fisurii într-un ciclu de solicitare este guvernată de asemenea de K_{\max} și β . S-a observat de asemenea că $\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ este un parametru ce determină viteza de propagare a fisurii pe ciclu de solicitare. Aceste concepte au fost foarte greu acceptate datorită faptului că autorii nu au găsit o revistă de prestigiu care să le publice lucrarea. Aceasta a apărut până la urmă în revista „*Tendințe în inginerie*”, un periodic publicat de către Universitatea Washington din St. Louis.

Mai multă atenție a fost acordată propagării fisurii prin oboseală și problemelor adiacente de către cercetătorii din U.R.S.S. unde cei mai mulți dintre ei erau preocupați de construcția unor expresii analitice privind relația dintre propagarea ciclică a fisurii și factorul de intensitate a tensiunilor. În 1962, G. P. Cherepanov [43] lucra la o teorie bazată pe aplicarea mecanicii ruperii la propagarea microfisurilor de oboseală și a furnizat o relație de calcul în acest sens.

1.9. Influența condițiilor de mediu asupra fisurării

În anii 1930 s-a observat faptul că umezeala influențează propagarea fisurii. S-a constatat faptul că forța necesară tăierii blocurilor de mică scade în prezența umezelii puternice – Obreimoff, 1930 [202]. Explicația acestui fenomen a fost că are loc o acțiune a moleculelor de apă reducând forțele de coeziune dintre componentele de mărime atomică ale solidului. În Uniunea Sovietică, Rehbinder studiază și dezvoltă metode de tăierea și găurirea rocilor folosind anumite tipuri de lichide. Efectul Rehbinder a fost cunoscut în afara Uniunii Sovietice de-abia după al doilea război mondial. Este cunoscut faptul că Dr. Arthur Ruark, unul din principalii colaboratori ai lui Irwin, a susținut refacerea studiilor la rupere utilizând teoria lui Griffith și ținând seama de efectul Rehbinder. Refuzul lui Irwin (la acea dată) era justificat de faptul că nu era clar modul de apariție a deformațiilor plastice în cadrul propagării fisurii. Înainte de 1957 tehnicile de control privind fisurarea corozivă sub tensiune nu țineau cont de efectul sinergetic al defectelor inițiale de tip fisură.

Studii privind influența condițiilor de mediu asupra distrugerilor prin ruperea probelor prefisurate, confecționate din oțel aliat de înaltă rezistență au fost efectuate de Steigerwald în anii 1960. Studii asupra vitezei de propagare a fisurii datorită coroziunii sub tensiune au fost făcute de Johnson și Wilner, 1965 [144]. În cadrul Laboratorului de Cercetare Navală, în 1965, Brown și Beachem [33] extind conceptele Mecanicii ruperii spre fisurarea corozivă sub tensiune, propunând un standard de încercare pentru evaluarea susceptibilității la fisurare corozivă sub tensiune a metalelor ce conțin fisuri încă din procesul de fabricație. Ei arată că valoarea de prag pentru fisurarea corozivă sub tensiune, K_{ISCC} , a unui sistem material-mediu considerat, nu trebuie să apară înainte de propagarea fisurii.

1.10. Deformația plastică la vârful fisurii

Teoria elasticității liniare arată faptul că tensiunea devine infinită la vârful fisurii. În materialele reale, tensiunea la vârful fisurii este limitată de tensiunea de curgere și de către deformația plastică ce apare în această zonă. Primele încercări de a determina

mărima zonei deformat plastic de la vârful fisurii au fost făcute de către Irwin și colaboratorii săi în anul 1958. Lucrarea publicată în acest sens descrie încercările efectuate pentru determinarea lui G , atât în cadrul stării plane de tensiuni cât și în cadrul stării plane de deformăție. Prin simpla egalare a tensiunii elastice de la vârful fisurii cu tensiunea de curgere, Irwin a găsit că mărima zonei deformat plastic este dată de:

$$r_y = \frac{1}{2} \pi \left(\frac{K}{\sigma_c} \right)^2 \quad (1.5)$$

în care r_y este mărima zonei deformat plastic, iar K reprezintă factorul de intensitate a tensiunilor. După ce a ținut cont de o redistribuire a tensiunilor la vârful fisurii, o analiză ulterioară a estimat mai bine mărima zonei deformat plastic ca fiind $2r_y$.

Conceptul privind plasticitatea la vârful fisurii a fost prezent și în primul raport de Mecanica ruperii prezentat de ASTM. Raportul arată că plasticitatea la vârful fisurii conduce la valori supraestimate pentru factorul de intensitate a tensiunii K . Pentru calculele ingineresti s-a propus ca efectul zonei deformat plastic de la vârful fisurii să se regăsească în relația:

$$a_{ef} = a + r_y \quad (1.6)$$

în care a este lungimea adevărată a fisurii în materialul elasto-plastic, a_{ef} este lungimea efectivă a fisurii în materialul perfect elastic iar r_y este dat de ecuația (1.5).

Prin idealizarea deformației plastice la materialele cu comportare elastică neliniară, Rice a reușit să generalizeze conceptul energiei relaxate în cadrul propagării fisurii la materialele neliniare și să arate că această energie este echivalentă cu o expresie integrală, așa numita integrală J , (J de la Jim Rice) [245]. Lucrarea celebră din 1968 care prezenta realizările sale în acest sens, a primit premiul ASTM. Integrala J a reprezentat senzația Simpozionului Național de Mecanica Ruperii din anul 1970 de la Universitatea din Illinois și a primit o puternică susținere atunci când Comitetul ASTM E-24 a indicat faptul că poate fi utilizată pentru caracterizarea tenacității materialelor.

1.11. Fluajul și ruperea vâsco-elastică

Componentele structurale ce lucrează la temperaturi înalte pot ceda prin rupere vâsco-elastică (fluaj). După ce a fost unanim acceptat conceptul integralei J ca parametru care să caracterizeze ruperea, numeroși cercetători (Landes și Begley, 1976, Ohji și al., 1976, Nibkin și al., 1976) [165, 204, 201], au propus o versiune a integralei J care să cuprindă și fenomenul de fluaj. Acest concept începe să devină cunoscut ca integrala C^* (creep) ce caracterizează zona de la vârful fisurii în materialul vâscos. Studii experimentale (Landes și Begley, 1976, Riedel, 1989) [247], au confirmat predicțiile teoretice privitoare la faptul că, la viteze mici de deformare starea dominantă din unele materiale o reprezintă fluajul ce se stabilește înainte de apariția fisurilor. Cele mai multe mecanisme de fisurare aplicabile pentru oțeluri nu pot fi în mod direct aplicate pentru polimeri, mecanismele de rupere vâsco-elastice necesitând căutarea unui răspuns adecvat al materialului. S. N. Zurkov contribuie la elucidarea fenomenelor fizice care au loc la vârful fisurii într-un polimer supus solicitării prin punctarea faptului că ruperea legăturilor lanțului de macromolecule joacă un rol fundamental în ruperea polimerilor. Contribuții majore în cadrul mecanismelor de fisurare vâsco-elastică pot fi găsite în cartea lui J.G. Williams, 1984 [312].

1.12. Standardizarea încercărilor la rupere

Două evenimente din anul 1965 au avut o influență profundă asupra dezvoltării Mecanicii ruperii. Primul a fost constituirea Comitetului E-24 al ASTM pentru încercarea la rupere a metalelor. Acest comitet a contribuit în mod semnificativ la standardizarea metodelor de încercare la rupere și la înțelegerea comportării la rupere și la oboseală a materialelor și structurilor. De asemenea, acest comitet are un rol fundamental în cunoașterea și dezvoltarea Mecanicii ruperii prin sponsorizarea anumitor conferințe, simpozioane, etc. inclusiv a Simpozionul Național de Mecanica Ruperii din S.U.A. care se desfășura anual. Cele mai multe lucrări prezentate la acest simpozion apăreau și în Publicațiile Tehnice Speciale (STP) ale ASTM. Al doilea eveniment important pentru dezvoltarea Mecanicii ruperii a fost reprezentat de publicațiile ASTM STP 381 intitulate „*Încercări pentru determinarea tenacității la fisurare și aplicațiile acesteia*”. Acest volum conține lucrări ce privesc diferite aspecte ale tehnologiei mecanismelor de fisurare printre care:

1. O privire critică asupra principiilor Mecanicii ruperii – Weiss & Yukawa, 1965 [300];
2. Prima lucrare privind factorii de intensitate a tensiunii, Paris & Sih, 1965 [219];
3. O discuție asupra efectelor plasticității la scară redusă, McClintock & Irwin, 1965 [185];
4. O discuție privind viteza de propagare a fisurii și considerații privind oprirea fisurii, Kraft & Irwin, 1965 [161];
5. Privire critică și evaluarea metodelor de încercare utilizate pentru măsurarea tenacității la fisurare, Srawley & Brown, 1965 [283];
6. Utilizarea microscopiei electronice pentru studiul suprafețelor rupte, Beachem & Pelloux, 1965 [22];
7. Exemplu de aplicare a Mecanicii ruperii în proiectarea și analiza vaselor sub presiune, Tiffany & Masters, 1965 [291].

Au fost incluse și discuțiile în care diferiți experți au dezbătut și clarificat anumite aspecte ale Mecanicii ruperii. Semnificația acestei publicații este evidentă deoarece multe din aceste lucrări continuă să rămână de referință în literatura de specialitate curentă.

1.13. Concluzii

Aspecte istorice ale dezvoltării Mecanicii ruperii au fost publicate pentru prima dată de către Irwin și Wells în 1965. Un volum special în onoarea lui G.R. Irwin și articole asupra dezvoltării și aplicațiilor Mecanicii Ruperii Linear Elastice au fost publicate de către Sih, Wei, și Erdogan în 1975 [272]. Publicația ASTM din 1989 editată de J. M. Barsom prezintă o colecție de „Lucrări Clasice Timpurii” din perioada 1913-1965. Din aceste lucrări rezultă că problemele complexe asociate cu ruperea, comportarea la rupere și încercările la rupere au întârziat acceptarea Mecanicii ruperii ca disciplină o perioadă îndelungată de timp. Conceptele de bază a Mecanicii Ruperii Linear Elastice implică complexități conceptuale și analitice mai puține decât cele asociate cu mecanismele plasticității și dislocațiilor. În acest context, mecanismele de

plasticitate și dislocație au fost introduse după înțelegerea deplină a ruperii în domeniul elastic în perioada 1947-1960. În fapt, o întârziere și mai mare în dezvoltarea Mecanicii ruperii putea apărea dacă s-ar fi continuat cu luarea în considerare, în exclusivitate, a similitudinii și coeficientului de siguranță în cadrul proiectării. Neînțelegerea influenței efectului mărimii pieselor, a defectelor de fabricație, a clivajului în oțelurile structurale, de asemenea a influenței oboselii și a fisurării corozive sub tensiune, asupra cedării prin rupere au făcut ca aceste cedări să pară de cele mai multe ori ca fiind nepredictibile și care împiedică dezvoltarea unor modele de analiză. Complexitățile apărute au fost foarte mari iar încurajările nu au fost pe măsură. În ultima decadă, cercetările în domeniul Mecanicii ruperii au condus la un număr foarte mari de studii cu o creștere exponențială. Ca urmare, o selecție a celor mai importante descoperiri devine o problemă serioasă. Concomitent cu așezarea disciplinei de Mecanica ruperii trebuie promovate și cercetările interdisciplinare în vederea unei mai bune înțelegeri a cedărilor datorită ruperii. Acestea largesc orizontul cercetării dar nu trebuie pierdute din vedere obiectivele de bază ale cercetării în domeniul ruperii care sunt înțelegerea mecanismelor de rupere și punerea lor în practică.

Actualmente, o sarcină importantă este cea educațională. Deși nu toate aspectele cedării prin rupere sunt în totalitate înțelese, informațiile de bază sunt disponibile, aplicate pe scară largă și trebuie integrate în cursuri complementare cu Rezistența materialelor. Rossmanith a publicat în 1996 volumul „Învățarea și educația privind fenomenele de rupere și oboseală” care prezintă conceptele de bază ale Mecanicii ruperii, într-o manieră directă și simplă.

Având în vedere cele expuse, se poate spune că *scena* Mecanicii ruperii este întreaga lume a ingineriei, actorii sunt inginerii și oamenii de știință, iar tema o reprezintă „Înțelegerea mecanismelor de rupere și punerea lor în practică”. În aceste condiții, explorarea istoriei Mecanicii ruperii se arată a fi la fel de plină de aventură ca și fenomenele ce apar la vârful unei creștături.