

BIULETYN NR 1 1991



Zespół redakcyjny: mgr inż. Jerzy Dobosiewicz, dr inż. Jerzy Trzeszczyński

Począwszy od niniejszego numeru „Energetyki” chcielibyśmy systematycznie, raz na kwartał, zamieszczać Biuletyn Pro Novum, zawierający artykuły naszych pracowników oraz współpracujących z nami specjalistów, praktyków i przedstawicieli nauki.

Pragniemy, aby artykuły prezentowały dorobek naszej firmy, a jednocześnie poruszały problemy ważne z punktu widzenia praktyki remontowej i eksploatacyjnej w krajowych elektrowniach.

Wśród różnorodnej tematyki, jaka zagości na łamach kolejnych Biuletynów Pro Novum, szczególne miejsce będą zajmować zagadnienia diagnostyki materiałowej, oceny stanu technicznego urządzeń ciepłno-mechanicznych elektrowni w aspekcie określania stopnia wyczerpania trwałości materiału, technologii napraw oraz bezpiecznej i racjonalnej eksploatacji.

Zespół redakcyjny

Dr inż. Jerzy Trzeszczyński

Pro Novum — Katowice

UKD 621.184.7.004.1

Krucze pęknięcie elementów bloku energetycznego

Zużycie elementu konstrukcji ma prawie zawsze charakter lokalny. Utrata funkcji użytkowych jest związana z wystąpieniem nadmiernych deformacji plastycznych lub pęknięć. Skutki nadmiernych, lokalnych deformacji zwykle nie są groźne, a kryteria przejścia materiału w stan plastyczny są precyzyjnie (teoretycznie i eksperymentalnie) zdefiniowane. Niebezpieczniejsze w skutkach są pęknięcia, zwłaszcza te, które w określonych warunkach podlegają nagłemu lawinowemu wzrostowi, mogącemu doprowadzić do całkowitego zniszczenia elementu konstrukcji. Przypadki takich awarii w energetyce są ciągle jeszcze niewystarczająco dobrze zbadane, toteż występują duże problemy przy próbach ich przewidywania na drodze obliczeniowej analizy stanu wytrzymałościowego konstrukcji. Istotną cechą zagrożenia pęknięciami kruchymi jest ich występowanie przy naprężeniach znacznie niższych od wywołujących makroskopowe odkształcenia plastyczne. Kryteria wytrzymałości oparte np. na naprężeniach dopuszczalnych zupełnie wtedy zawodzą.

Mechanizm kruchego pęknięcia

Począwszy od pierwszego, ilościowego ujęcia procesu pęknięcia przez Griffitha [1] nie budzi zastrzeżeń stwierdzenie, że podstawowym warunkiem zaistnienia kruchego pęknięcia elementu jest obecność w materiale nieciągłości struktury o rozmiarach krytycznych. Inicjatorami nieciągłości (mikropęknięć) mogą być defekty struktury w postaci zażużeń, rozwalcowanych wtrąceń niemetalicznych, mikroporów skurczowych itp. Mikropęknięcia mogą zwiększać swoje rozmiary w procesie technologicznym lub podczas eksploatacji, zwłaszcza wtedy, gdy były zlokalizowane w Potencjalnych Strefach Zniszczenia (PSZ), tj. obszarach (rys. 1) o dużej koncentracji naprężeń (karby strukturalne, geometryczne, termiczne). Mikropęknięcia mogą także powstać w PSZ nie zawierających defektów, po dostatecznie dużej liczbie cykli zmian naprężeń o określonej amplitudzie. W takich przypadkach w analizie kinetyki

wzrostu pęknięcia należy uwzględnić czas inkubacji (zarodkowania) mikropęknięć τ_z . Jest to okres, w którym nastąpi lokalne wyczerpanie trwałości materiału wskutek kumulowania się odkształceń trwałych w niewielkiej jego objętości [3].

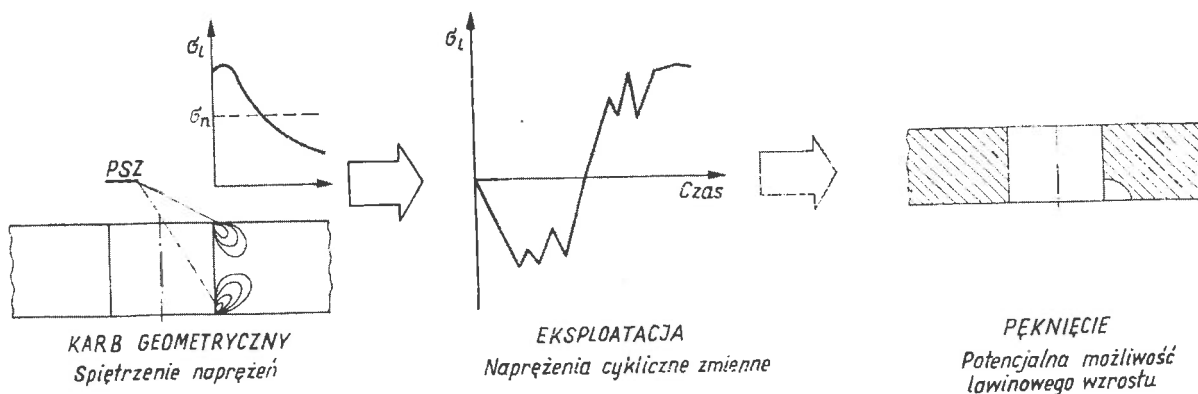
Zależność między rozmiarami defektu struktury a czasem niezbędnym do jego wykrycia metodami nieniszczącymi pokazano na rysunku 2 w części A wykresu. W niejednorodnym podczas eksploatacji polu naprężeń i temperatur, pęknięcie po osiągnięciu określonych rozmiarów może ulec zatrzymaniu. Podobny efekt może wywołać przeciążenie elementu, gdy spowoduje odpowiednio duże uplastycznienie materiału przed frontem pęknięcia. Zatrzymanie wzrostu pęknięcia może być czasowe lub trwałe, zależnie od jego długości oraz warunków dalszej eksploatacji (lokalnego przebiegu naprężeń—odkształceń i temperatury). Pęknięcia podlegające wzrostowi zmęczeniu mogą osiągnąć rozmiary, które — w określonych warunkach naprężenia i temperatury — umożliwiają ich przyspieszony rozwój. Zidentyfikowano i opisano dwa rodzaje takiego wzrostu:

- **podkrytyczny** — gdy materiał charakteryzuje się wystarczającą odpornością na pęknięcie,
- **lawinowy** — gdy w materiale nie ma naturalnej bariery przeciwdziałającej możliwości rozwoju pęknięcia z prędkością porównywalną z prędkością propagacji fali dźwiękowej w danym ośrodku.

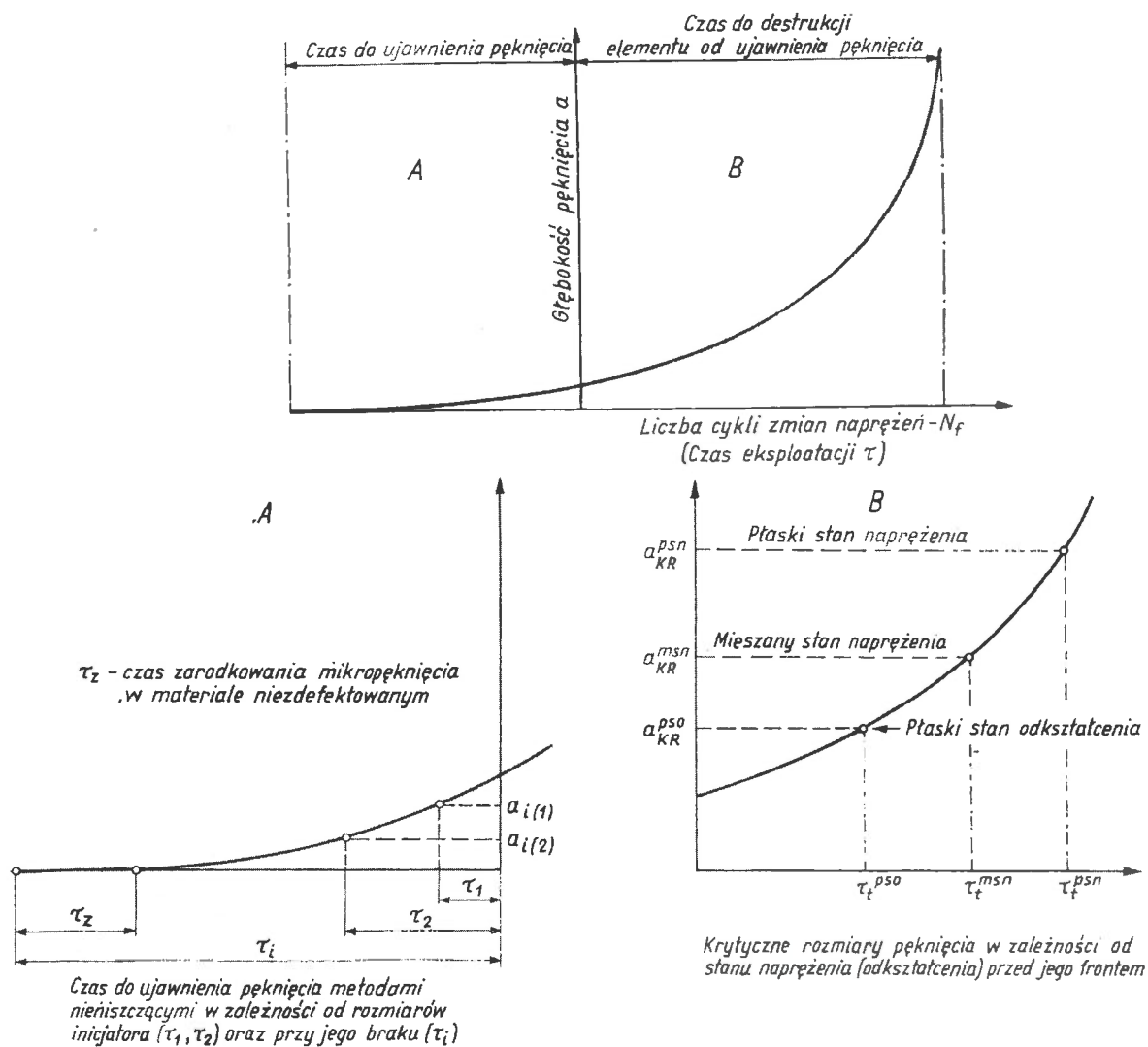
Dla zbiorników ciśnieniowych jest powszechnie znany wzór (1), który wiąże ze sobą najważniejsze wielkości określające warunki propagacji pęknięć lawinowych [2]:

$$K_{Ic} = 1,1 \sqrt{\pi} M_k \sigma \sqrt{a/Q}, \quad (1)$$

- a — głębokość pęknięcia,
- σ — naprężenie,
- M_k — współczynnik uwzględniający głębokość pęknięcia (w stosunku do grubości ścianki),
- Q — współczynnik kształtu pęknięcia.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie Potencjalnej Strefy Zniszczenia (PSZ) i mechanizmu generowania w niej mikropeknięć podlegających wzrostowi
 σ_n — naprężenia nominalne, σ_l — naprężenia lokalne



Rys. 2. Inicjowanie i wzrost mikropeknięć do rozmiarów krytycznych

Pęknięcie w zbiorniku ciśnieniowym może niekiedy osiągnąć rozmiary (głębokość) przekraczające rzeczywistą grubość ścianki. Czy w takim przypadku lawinowy rozwój pęknięcia jest nieunikniony? Przeprowadzona przez Irwina [4] analiza

tego przypadku (przy wykorzystaniu mechaniki pęknięcia) wykazała, że tak powstała nieszczelność może być stabilna, a warunki stabilności można precyzyjnie zdefiniować (tzw. efekt leak-before-break). Pęknięcia w elemencie stanowią

zagrożenie dla jego bezpiecznej eksploatacji, nie przesądzają jednak o nagłej awarii; by ona wystąpiła konieczne jest jeszcze m.in., aby pęknięcie znalazło się w polu naprężeń o odpowiedniej intensywności.

Siłą napędową procesu lawinowej propagacji szczeliny jest obniżenie ogólnej energii układu, będącej sumą energii sprężystej zgmagazynowanej w obciążonym elemencie oraz energii powierzchniowej rozwijającego się pęknięcia. Propagacja pęknięcia jest związana z zamianą jednej składowej energii na drugą. Zależność między składowymi energii stanowi krytyczny warunek dla rozwoju pęknięć znajdujących się w materiale. W praktyce oznacza to, że im większy jest element i bardziej naprężony, tym większy staje się stopień destrukcji po zainicjowaniu pęknięcia.

Trzecim czynnikiem, od którego zależą moment i tempo rozwoju mikropęknięć pierwotnych jest odporność materiału na pęknięcie, określana najczęściej za pomocą krytycznej wartości współczynnika intensywności naprężeń K_{Ic} . Z praktycznego punktu widzenia, istotne znaczenie ma określenie zespołu warunków, przy których K_{Ic} osiąga wartość minimalną (krytyczną). Decydują o tym przede wszystkim:

- stan naprężenia—odkształcenia w części elementu zawierającej pęknięcie,
- temperatura metalu.

Pęknięcia kruche mają najlepsze warunki do rozwoju, gdy: w strefie pęknięcia występuje płaski stan odkształcenia (część B na rysunku 2), a temperatura jest niższa od tzw. progu kruchości materiału.

Płaski stan odkształcenia można najłatwiej wywołać w elementach grubościennych (składowa odkształcenia po grubości ścianki jest zerowa lub bliska zeru).

Próg kruchości materiału jest najczęściej określony tzw. temperaturą zerowej ciągliwości (NDT); z wystarczającą dla praktyki dokładnością może on być wyznaczony w próbach udarności przez ustalenie tzw. temperatury przejścia materiału w stan kruchy T_{ko} .

Pełną charakterystykę materiału w odniesieniu do propagacji pęknięć zawierają wykresy FAD (fracture analysis diagram). Istotny problem stanowi brak takich charakterystyk dla materiałów stosowanych w krajowych elektrowniach.

Rozwój pęknięć kruchych w elementach bloku energetycznego

Przedstawiony opis mechanizmu kruchego pęknięcia należy traktować jako próbę sformułowania ogólnego modelu zjawiska. Analiza warunków pęknięcia elementów rzeczywistych wskazuje na wiele osobliwości oraz czynników komplikujących ten model. Przykładem mogą tu być problemy związane z ilościowym opisem zjawiska inicjowania i wzrostu pęknięć w strefie połączenia płaszcza walczaka z króćcem centralnej rury opadowej; potencjalnym i rzeczywistym [5] miejscem generowania pęknięć zmęczeniowych zagrożonych lawinowym wzrostem.

Analiza stanu wytrzymałościowego tej strefy sprawia znaczne trudności ze względu na:

- nieznaną dokładnie koncentrację naprężeń,
- trudny do dokładnego określenia gradient naprężeń,
- nieznanne zmiany współczynnika intensywności naprężeń w zależności od kształtu i głębokości szczeliny oraz jej usytuowania w stosunku do kierunku naprężeń głównych,
- złożony stan naprężenia i trudne do dokładnego określenia kształt i rozmiary pęknięcia,
- niejednorodne i trudne do określenia własności materiału w strefie spoiny,
- nieznaną na ogół historię zmian naprężeń—odkształceń i temperatury.

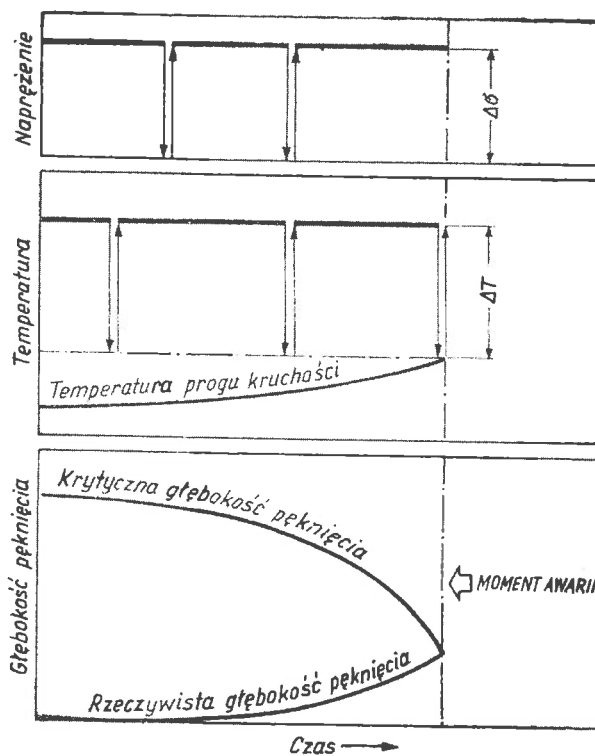
Nieco inne problemy występują przy próbie analizy warunków propagacji pęknięć w pozostałych elementach bloku zagrożonych kruchym pękaniem, np. w kolanach rurociągów. Zagrożone kruchym pękaniem są wyłącznie kolana głównych rurociągów parowych w elektrowniach pracujących w układzie kolektorowym. Zagrożenie to dotyczy kolan na odcinku między kolektorem a zasuwą odcinającą przed zaworem szybkozamykającym. Generowane w kolanach mikropęknięcia są wynikiem:

- a) pełzania — w głównych rurociągach pary świeżej,
- b) korozji naprężeniowej — w rurociągach odprowadzających.

Dodatkowo, wskutek degradacji struktury w miejscach występowania wymienionych zjawisk, następuje lokalnie obniżenie plastyczności i odporności na pęknięcie, nawet 2,5-krotne [6] w porównaniu z prostym odcinkiem rurociągu po takim samym okresie eksploatacji.

Niewątpliwie najdogodniej i dość dokładnie można wykonać obliczenia, z wykorzystaniem kryteriów mechaniki pęknięcia, w odniesieniu do wirników (WP, SP, NP) i generatorów, z racji ich kształtu, rodzaju materiału, technologii wykonania oraz warunków pracy. Większe trudności w obliczeniach występują przy analizie kruchego pęknięcia kołpaków generatorów, głównie ze względu na mechanizm inicjowania mikropęknięć i geometrię strefy ich najbardziej prawdopodobnej lokalizacji.

Niezależnie od niektórych wymienionych osobliwości warunków propagacji pęknięć należy podkreślić, że zespół głównych czynników wywołujących kruchą destrukcję zagrożonych tego rodzaju zniszczeniem elementów jest identyczny (rys. 3). Fakt ten należy traktować jako podstawę skutecznej profilaktyki i zapobiegania kruchemu pękaniu. Opracowana w naszej firmie instrukcja eksploatacji i kontroli walczaków ze stali 18CuNMT [5] jest tego przykładem.



Rys. 3. Zespół warunków koniecznych do spowodowania kruchego pęknięcia elementów bloku

$\Delta\sigma$, ΔT — okresowe spadki naprężenia w elemencie i jego temperatury

Ocena ryzyka rozwoju kruchych pęknięć jako element analizy stanu wytrzymałościowego walczaka

Spośród mogących ulec kruchemu zniszczeniu elementów bloku najtrudniej przewidzieć awarie walczaków. Nie poprzedza ich bowiem zmiana żadnego z parametrów rejestrowanych podczas eksploatacji, jak np. nadmiernych drgań wirników turbin i generatorów. Podobny problem odnosi się do wczesnej detekcji zagrożenia kruchym pękaniem kołpaków generatorów. W przypadku kolan głównych rurociągów parowych istnieje wprawdzie możliwość wykrycia degradacji struktury poprzedzającej powstanie mikropęknięć, ale czas między stwierdzeniem tego faktu a lawinowym ich wzrostem może okazać się zbyt krótki do podjęcia skutecznych środków przeciwdziałających awarii. Tym bardziej że pęknięcia pełzaniowe uważa się za nienaprawialne.

Z rysunku 3 wynika, że warunki sprzyjające kruchemu pękaniu mogą wystąpić:

- a) w walczakach — podczas próby wodnej,
- b) w kolanach rurociągów — w okresach, gdy niektóre fragmenty rurociągu znajdują się pod ciśnieniem, ale bez przepływu,
- c) w wirnikach WP i SP turbin — podczas próby nadobrotów,
- d) w wirnikach NP turbin oraz w wirnikach generatorów i w kołpakach — w każdej fazie eksploatacji.

Jako podsumowanie rozważań nt. kruchego pęknięcia elementów bloków energetycznych przedstawiamy schemat obliczeń opracowany w naszej firmie i wykorzystywany przez nas do oceny stanu technicznego walczaków kotłów.

1. Ocena stopnia wyczerpania trwałości materiału płaszcza walczaka w potencjalnych strefach zniszczenia:
 - a) analiza stanu wytrzymałości walczaka w zakresie naprężeń statycznych i cyklicznie zmiennych;
 - b) określenie lokalizacji PSZ; wyznaczenie naprężeń—od-

kształceń przy charakterystycznych ciśnieniach (obliczeniowym, roboczym, próby wodnej, próby szczelności);
c) analiza ubytku trwałości w PSZ.

2. Określenie warunków rozwoju pęknięć zmęczeniowych i lawinowych w PSZ, dzięki:

- a) rekonstrukcji parametrów charakteryzujących własności zmęczeniowe i odporność na pęknięcie na podstawie danych atestowych (jeśli brak wiarygodnych danych określonych eksperymentalnie);

- b) obliczeniu:

- głębokości wady krytycznej,
- naprężeń i ciśnień krytycznych dla pęknięć o określonej głębokości i najbardziej prawdopodobnym kształcie,
- rozmiarów pęknięć nie rozwijających się przy charakterystycznych warunkach eksploatacji,
- kinetyki rozwoju pęknięć zmęczeniowych.

- c) określeniu warunków stabilnego przecieku podczas próby wodnej i próby szczelności oraz w pracy ustalonej.

Analiza wielu przypadków nagłych awarii walczaków, w tym także krajowych [5, 7] doprowadziła nas do przekonania, że ze względów profilaktycznych każda ocena stanu technicznego elementów zagrożonych kruchym pękaniem powinna zawierać określenie ryzyka nagłego uszkodzenia konstrukcji oraz zalecenia to ryzyko minimalizujące.

LITERATURA

- [1] Griffith A. A.: *Phil. Trans. Royal Soc., Series 221*
- [2] Rolfe S. T., Barsom J. M.: *Fracture and Fatigue Control in Structures*. Prentice-Hall, Inc. 1977
- [3] Glinka G.: *A Cumulative Model of Fatigue Crack Growth*. *International Journal of Fatigue*, 1982
- [4] Irwin G. R. at all: *Basic Aspects of Crack Growth and Fracture*. *NRL Report 6598*, 1967
- [5] Sprawozdanie Pro Novum nr 35/90
- [6] Sprawozdanie Pro Novum nr 6.41/91
- [7] Sprawozdanie Pro Novum nr 52/89/A

panovum

Mgr inż. Ewa Zbroińska-Szczuchura, mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

UKD 621.184.7.004

Pro Novum — Katowice

Całkowite zniszczenia walczaków kotłów parowych

W latach 1986—1989 w energetyce krajowej podczas prób wodnych całkowitemu zniszczeniu uległy dwa walczaki. Badania prowadzone przez wiele instytucji potwierdziły, że przyczyną zniszczenia były nagłe pęknięcia kruche (rys. 1). Pęknięć tych nie poprzedzają wyraźne oznaki zewnętrzne. Pojawiają się nagle, a ich propagacja jest bardzo szybka, tak że materiał w określonych warunkach ma zbyt małą odporność, by ją zatrzymać.

Nagłe pęknięcie kruche może powstać przy jednoczesnym wystąpieniu trzech czynników, tj.:

- 1) nagromadzeniu się w konstrukcji dużej energii sprężystej, gdy naprężenia nominalne nie przekraczają granicy plastyczności;
- 2) obecności w metalu tzw. inicjatorów pęknięć, którymi mogą być nieciągłości lub niejednorodności powstałe podczas wykonywania lub eksploatacji konstrukcji;
- 3) skłonności materiału do kruchego pęknięcia, zależnej od jego własności mechanicznych, zwłaszcza od stosunku R_e/R_m (gdy jest on mniejszy od 0,65), oraz od temperatury przejścia w stan kruchy T_{ko} ; temperatura ta zależy od rodzaju materiału, szybkości wzrostu naprężeń i ewentualnych zmian w strukturze materiału podczas jego eksploatacji.

Wspomniane uszkodzenia dwóch krajowych walczaków nie są wyjątkiem. Podobne awarie wystąpiły za granicą. I tak, w energetyce niemieckiej całkowitemu uszkodzeniu uległo 14 walczaków, we Francji — 2, w Anglii — 2 i podobno również 2 w Szwecji. Uszkodzenia te zostały bardzo dokładnie zbadane i opisane w literaturze technicznej. Z analizy porównawczej wynika, że mają one wiele cech wspólnych z krajowymi przypadkami takich uszkodzeń.

- Uszkodzenia kruche wystąpiły podczas prób wodnych prowadzonych w temperaturze otoczenia (niższej od 20°C), w tym w 14 przypadkach u użytkowników, a w 2 u wytwórców walczaków (nowe walczaki).

- Uszkodzenie zawsze początkowała nieciągłość umiejscowiona w okolicy otworu lub spoiny. W jednym przypadku przyczyną pęknięcia okazała się niejednorodna struktura, która obniżyła plastyczność metalu.

- Przyczynami powstawania inicjatorów okazały się: wady technologiczne i materiałowe oraz pęknięcia eksploatacyjne.

- Uszkodzeniom uległy walczaki wykonane ze stali stopowych o podwyższonej wytrzymałości ($R_e/R_m > 0,65$).