

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 mikropeknięć, 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:

- w walczakach — podczas próby wodnej,
- w kolanach rurociągów — w okresach, gdy niektóre fragmenty rurociągu znajdują się pod ciśnieniem, ale bez przepływu,
- w wirnikach WP i SP turbin — podczas próby nadobrotów,
- 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.

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

kształceń przy charakterystycznych ciśnieniach (obliczeniowym, roboczym, próby wodnej, próby szczelności);

- analiza ubytku trwałości w PSZ.
- Określenie warunków rozwoju pęknięć zmęczeniowych i lawinowych w PSZ, dzięki:
 - rekonstrukcji parametrów charakteryzujących własności zmęczeniowe i odporność na pęknięcie na podstawie danych atestowych (jeśli brak wiarygodnych danych określonych eksperymentalnie);
 - 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.
 - 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

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

pronovum

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.:

- nagromadzeniu się w konstrukcji dużej energii sprężystej, gdy naprężenia nominalne nie przekraczają granicy plastyczności;
- obecności w metalu tzw. inicjatorów pęknięć, którymi mogą być nieciągłości lub niejednorodności powstałe podczas wykonywania lub eksploatacji konstrukcji;
- 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.

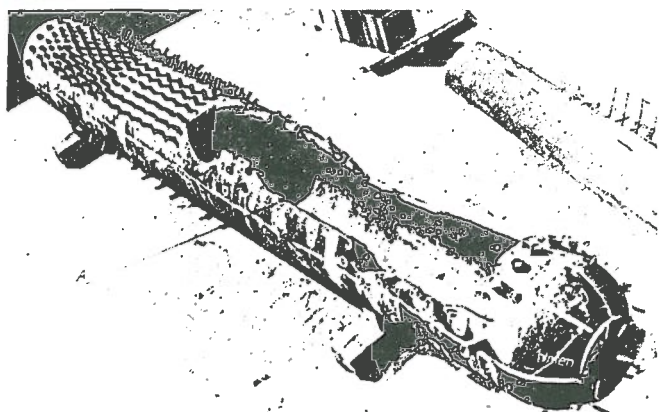
Wspomniane uszkodzenia dwóch krajowych walczaków nie są wyjątkiem. Podobne awarie wystąpiły za granicą. I tak, w energetyce niemieckiej całkowitemu uszkodzeniu uległo 14 walczaków, we Francji — 2, w Anglii — 2 i podobno również 2 w Szwecji. Uszkodzenia te zostały bardzo dokładnie zbadane i opisane w 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 ($R_e/R_m > 0,65$).



Rys. 1. Całkowite zniszczenie walczaka podczas próby ciśnieniowej u wytwórcy [4]
A — umiejscowienie inicjatora

● Współczynnik bezpieczeństwa dla części walcowej (stosunek naprężeń nominalnych do granicy plastyczności) wynosił od 1,5 do 2,0.

● W czasie uszkodzenia naprężenie w ściance walczków wynosiło od 0,8 do 1,5 naprężenia nominalnego w części walcowej.

● Wytrzymałość doraźna, sprawdzona na próbkach pobranych z uszkodzonych walczków, mieściła się w granicach określonych w normie (raczej w pobliżu górnych wartości). Parametry charakteryzujące plastyczność materiału (wydłużenie, udarność) mieściły się w dolnych granicach dopuszczonych w normie, a w niektórych przypadkach, zwłaszcza w odniesieniu do próbek poprzecznych, były nawet niższe, ale zawsze wzrastały wraz z temperaturą.

● Współczynnik intensywności naprężeń K_{Jc} charakteryzujący odporność materiału na kruche pęknięcie, wyznaczony dla próbek pobranych z uszkodzonych elementów, był stosunkowo wysoki — od 50 do 80 MPa \sqrt{m} (dla temperatur pokojowych) i wzrastał wraz z temperaturą.

● Wymiary wykrytych pęknięć, inicjujących uszkodzenie, były następujące: głębokość a od 4 do 45 mm, długość $2c$ od 10 do 70 mm. Wymiary te były ściśle związane z naprężeniami rzeczywistymi; im większe naprężenie tym mniejszy wymiar inicjatora.

● Głębokości krytyczne pęknięć obliczone ze wzoru:

$$a_c = \frac{(K_{Jc})^2 Q}{\pi \sigma^2}$$

(σ — naprężenie nominalne, w mostku lub na krawędzi otworu, $Q = 0,9-1,2$ — współczynnik kształtu pęknięcia),

pokrywały się z rzeczywistymi, dla różnych naprężeń branych do obliczeń. Gdy naprężenia nominalne σ mnożono przez współczynnik koncentracji naprężeń na krawędzi otworu $\alpha = 3$, w większości przypadków otrzymywano ze wzoru zbliżone wartości głębokości krytycznych.

● Dzięki badaniom strukturalnym wykryto niejednorodności mogące wpływać na własności mechaniczne materiału. Niejednorodności dotyczyły z reguły tekstury oraz udziału głównych składowych: ferrytu i bainitu. Pogarszało to własności plastyczne materiału, zwłaszcza w przypadku wystąpienia większej ilości bainitu.

● Próby starzenia wykazały, że w czasie eksploatacji badane stale w zasadzie nie zmieniają własności plastycznych, a krytyczna temperatura po starzeniu T nie przekracza 25°C. Natomiast stwierdzono, że zmiany mogą wystąpić w miejscach, w których łączne naprężenie znacznie przekracza granicę plastyczności.

● Z badań struktury mikroskopem elektronowym wynika, że mimo obróbki cieplnej oraz wyżarzania odprężającego po

spawaniu i gięciu blach nie udaje się całkowicie wyeliminować zgniotu.

● Badania na zmęczenie małowykliczne i korozyjne wykazały, że struktura bainityczna zwiększa odporność stali na zmęczenie, ale wyraźnie obniża jej odporność na korozję.

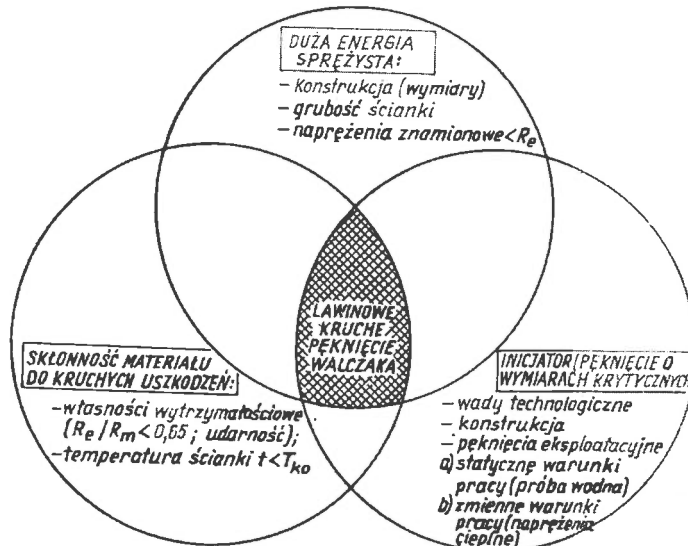
Tak więc niezawodność pracy walczaka zależy nie tylko od wartości współczynnika bezpieczeństwa, ale również od:

- stopnia wyteżenia materiału w zlokalizowanych objętościach,
- własności materiału, zwłaszcza jego plastyczności,
- zdolności do relaksacji,
- kształtu i wymiarów zmian geometrycznych,
- przede wszystkim zaś od niejednorodności w odniesieniu do ciągłości i struktury materiału.

Z danych eksploatacyjnych wynika, że bardzo istotną rolę odgrywają naprężenia własne oraz lokalna koncentracja naprężeń podczas pracy, zwłaszcza w miejscach o naruszonej ciągłości geometrycznej naczyńia (otwory).

Jak wiadomo stale o podwyższonej wytrzymałości są mało odporne na działanie karbu, a tym samym na uszkodzenia kruche. Charakteryzuje je ponadto mała zdolność do relaksacji naprężeń.

Rozprzestrzenianie się pęknięć jest zawsze ograniczone przy małym wyteżeniu materiału i gdy zachowuje on jeszcze swoją ciągliwość, a tym samym zdolność do relaksacji naprężeń. Dlatego też materiał o małej zdolności do relaksacji naprężeń należy w temperaturach powyżej CAT (crack arrest temperature) obciążać powoli; można wtedy uniknąć katastrofalnej propagacji pęknięć.



Rys. 2. Schemat powiązania i warunków koniecznych do powstania kruchego pęknięcia

Jak dotąd nie wyjaśniono całkowicie zjawiska zmian w strukturze metalu walczków. Prawdopodobnie ich wystąpienie jest związane z odkształceniami plastycznymi.

Należy podkreślić, że już w czasie pierwszej próby ciśnieniowej walczaka u wytwórcy naprężenia rozciągające na krawędziach otworów przekraczają granicę plastyczności materiału R_e . Dlatego po próbie wodnej w metalu powstają odkształcenia oraz naprężenia własne ściskające.

Odkształcenia trwałe mogą być przyczyną zmian strukturalnych w materiale walczaka oraz pojawienia się naprężeń własnych zmniejszających zapas wytrzymałości walczaka. Badania odporności na zmęczenie małowykliczne materiału walczków pracujących w temperaturach 200—400°C wykazały jedynie, że materiał nieczuły na próbę starzenia charakteryzuje się również małą skłonnością do pęknięcia pod wpływem działania naprężeń zmiennych.

Tabela 1

Rodzaje i częstość badań walczków kotłów parowych

Badany element	Badania:					Pomiar:		
	rentgenowskie	ultradźwiękowe	magnetyczne	wzrokowe (ogledziny)	metalograficzne	średnic	grubości	twardości
Spoiny główne	nowe spoiny — po remontach	po 100 tys. h	co 50 tys. h	co 20 tys. h				
Spoiny pomocnicze		CRO — co 50 tys. h	co 50 tys. h	co 20 tys. h				
Płaszcz				co 20 tys. h	po 100 tys. h	jednorazowy pomiar owalizacji	jednorazowo	po 100 tys. h
Króćce		co 50 tys. h	co 20 tys. h					
Otwory		co 20 tys. h	co 20 tys. h					

Inicjatory pęknięć mogą powstać podczas produkcji blach walczkowych, w procesie wykonywania walczaka oraz w czasie jego eksploatacji. Mogą mieć postać nieciągłości przestrzennych, płaskich lub powierzchniowych oraz niejednorodności strukturalnych; stają się bardzo niebezpieczne, gdy pojawiają się w pobliżu miejsc o dużej koncentracji naprężeń (otwory, spoiny).

Do oceny stanu walczaka można zastosować teorię mechaniki pęknięcia, nawet jeżeli pęknięcia zostały wykryte. W tym celu należy dokładnie znać rzeczywiste: dane materiałowe, wartości naprężeń i wymiary pęknięć.

Ponieważ wystąpienie lawinowego pęknięcia zależy wyraźnie od poziomu naprężeń, w eksploatacji należy unikać takich sytuacji, w których maksymalne naprężenia przekraczają $0,9 R_e$. Ze względu na możliwość wystąpienia w czasie eksploatacji pęknięć zmęczeniowych, obliczenia stopnia wyczerpania materiału walczaka powinny być oparte na rzeczywistych danych (różnice temperatury ścianki), a sam walczak powinien być poddawany badaniom nieniszczącym — ultradźwiękowym, magnetycznym i fluorodefektoskopowym (tab. 1). Szczególnie często należy wykonywać badania nieniszczące w miejscach spodziewanych koncentracji naprężeń, zwłaszcza w przypadku, gdy walczak jest wykonany ze stali 18CuMNT.

Wnioski

1. Stale o podwyższonej wytrzymałości, do których zalicza się stal 18CuMNT, mają skłonność do propagacji kruchych pęknięć i to zarówno w stanie wyjściowym, jak też po pewnym okresie eksploatacji.
2. Prawdopodobieństwo wystąpienia tego rodzaju uszkodzenia można zmniejszyć przez wyeliminowanie czynników warunkujących powstanie pęknięcia kruchego. Należy zatem:
 - ograniczyć liczbę prób wodnych przy ciśnieniu równym 1,25 ciśnienia roboczego,

- przestrzegać, by podczas próby wodnej temperatura ścianki walczaka była wyższa od 50°C ,
- zwiększać stopniowo ciśnienie podczas próby wodnej,
- kontrolować okresowo powierzchnię walczaka za pomocą badań nieniszczących,
- oprzeć obliczenia krytycznej głębokości wady i stopnia wyczerpania trwałości na rzeczywistych danych z eksploatacji,
- uwzględnić rzeczywiste wymiary i dane materiałowe w obliczeniach stanu wyężenia walczaka od naprężeń statycznych,
- ocenić stopień wyczerpania materiału walczaka.

LITERATURA

- [1] Dobosiewicz J.: Ocena stanu walczków kotłów wysokoprężnych. *Energetyka* 1985, nr 4
- [2] Plehl K.H.: Untersuchung über des versagen einer Keselfrommel der Druckprobe. VGB 1970, nr 50
- [3] Kusmaul K.: Formation Significance and Evaluation of Welding Defects in pressure Vessels. International Institute of Welding, 1972
- [4] Wellinger K., Kraegelch E., Kusmaul K., Sturm D.: Die Bruchgefahr bei Reaktordruckbehältern und Rohrleitungen. *Nuclear Engineering and Design* 1972, nr 20
- [5] Kusmaul K.: Resistans of welded Connstruktlions in Pressure Vessel. Staatliche Materialprufngsanstadt University of Stuttgart Germany, marzec 1971
- [6] Kusmaul K.: Diskussionsgrundlage zur Ermittlung von Bruchmechanischen Kennwerten an Kesseltrommeln. Staatliche Materialprufngsanstadt an der Universität Stuttgart, kwiecień 1971
- [7] Raport on the Brittle Frakture of a High-Pressure Boiler Drum at Cokenzle Power Station, styczeń 1967
- [8] Sprawozdanie nr 35/90 pt. „Określenie przyczyn powstania awarii walczaka kotła OP-380k bloku nr 1 w Elektrowni Łaziska. Końcowy raport z badań”. Pro Novum, Katowice grudzień 1990



Mgr inż. Jerzy Dobosiewicz

Pro Novum — Katowice

UKD 621.644.2.005.2

Uszkodzenia kolan rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania

Uszkodzenia kolan rurociągów parowych można podzielić na:

- pęknięcia zmęczeniowo-korozyjne na wewnętrznej powierzchni, w obojętnej strefie gięcia, kolan rurociągów pracujących w temperaturze do 390°C ,

- pęknięcia pełzaniowe na zewnętrznej powierzchni, w strefie rozciąganej, kolan rurociągów pracujących w temperaturze wyższej niż 390°C .

Na trwałość kolan rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania wpływają następujące czynniki: