

Warunki powstawania uszkodzeń zmęczeniowo-korozyjnych w walczakach kotłów wysokoprężnych

Conditions of fatigue and corrosion damages arising in high pressure boiler drums

Kotły bloków energetycznych pracują głównie w warunkach stacjonarnych, a okresy pracy w warunkach nieustalonych mają nieznaczny udział w ogólnej liczbie godzin pracy kotła. W literaturze światowej i krajowej opisano kilka przypadków całkowitego zniszczenia kilku walczaków w czasie wykonywania próby ciśnieniowej oraz liczne uszkodzenia w postaci pęknięć porażających krawędzie otworów oraz mostki znajdujące się w dolnej części walczaka poniżej lustra wody.

Walczaki, zgodnie z przepisami UDT, liczone są na podstawie granicy plastyczności, tj. na działanie naprężeń statycznych. Charakter wykrywalnych pęknięć wskazuje, że przyczyną ich powstawania jest korozja zmęczeniowa (mało- i wielocykliczna) wywołana działaniem naprężeń zmiennych mechanicznych i cieplnych; (próby ciśnieniowe, zrzuty awaryjne powodowane awaryjnością ekranów i podgrzewaczy wody oraz ciepłone). W czasie ciągłej pracy kotła częste zmiany różnicy temperatur między temperaturą nasycenia a temperaturą wody zasilającej powodują, że między nominalnym obciążeniem kotła a pracą pod zmniejszonym obciążeniem występują duże różnice w ilości przejmowanego ciepła przez poszczególne miejsca ścianki walczaka.

Uszkodzenia walczaków w energetyce krajowej i zagranicznej oraz wyniki przeprowadzonych badań nieniszczących i niszczących wskazują na potrzebę krytycznej analizy ich eksploatacji, sposobu naprawy oraz oceny stanu technicznego. W niniejszym artykule omówiono przyczyny ich powstawania oraz sposoby zapobiegania.

Przepracowana liczba godzin niektórych elementów urządzeń energetycznych ciepło-mechanicznych osiąga obecnie 250 000 – 300 000, dlatego informacje o stopniu degradacji metalu tych elementów są konieczne do oceny dalszej ich przydatności oraz dla ustalenia zakresów i okresów badań diagnostycznych lub ich wymiany.

W czasie eksploatacji zachodzi stopniowa degradacja własności metalu. Do głównych mechanizmów niszczenia – degradacji własności metalu elementów kotłowych należą:

- pełzanie,
- zmęczenie mało- i wielocykliczne,
- starzenie termiczne,
- korozja,
- erozja.

Trwałość elementów jest, w sposób istotny, zależna od przepracowanej liczby godzin i temperatury pracy, który to parametr nie jest wielkością stałą.

Duży, istotny problem stwarza fakt, że ciepła historia pracy urządzenia nie jest monitorowana w sposób ciągły, a większość uszkodzeń występujących w elementach krytycznych bloku (około 80%) jest powodowana zmęczeniem wywołanym głównie zmianami temperatury metalu (nie licząc łopatek turbin).

Elementy, lub całe konstrukcje, poddawane działaniu zmiennych naprężeń mogą ulegać zniszczeniu, mimo że poziom naprężeń nie przekracza granicy plastyczności metalu. Zniszczenie zmęczeniowe, a zwłaszcza zmęczenie korozyjne, jest przyczyną eksploatacyjnych uszkodzeń elementów ciśnieniowych. Występowanie zmęczenia metalu jest uwarunkowane cyklicznym, plastycznym odkształceniem.

Walczaki kotłów wysokoprężnych projektowane są według wartości granicy plastyczności (Ret) w podwyższonej temperaturze i, teoretycznie, na nieograniczony czas pracy. W projektowych obliczeniach wytrzymałościowych nie uwzględnia się obciążeń zmiennych – dynamicznych wywołanych naprężeniami mechanicznymi i cieplnymi. Grubości ścianek zgodnie z przepisami UDT obliczane są dla naprężenia stałego. W rzeczywistości w eksploatacji walczaka, nawet w stanach ustalonych, parametry pracy ulegają częstym zmianom i dlatego głównym procesem niszczenia jest zmęczenie korozyjne.

Elementy krytyczne bloków, a szczególnie kotłów, pracujące w warunkach pełzania współcześnie są projektowane na 200 000 – 250 000 godzin pracy. Słusznym jest, by pozostałe elementy, nieprojektowane na wytrzymałość czasową, które są narażone na korozyjne lub erozyjne ubytki pod wpływem działania gazowego lub ciekłego i stałego czynnika rozporządzały podobną trwałością.

Proces niszczenia zmęczeniowego polega na cyklicznym odkształceniu elementu. Stopniowe niszczenie metalu zachodzi wskutek gromadzenia mikrodefektów oraz wielkości ich przyrostu. Należy podkreślić, że przyrost pęknięcia może być powodowany naprężeniem statycznym, zwłaszcza w ośrodkach korozyjnych. W przypadku czysto cyklicznego obciążenia występuje przyrost pęknięć zmęczeniowych, a w przypadku jednoczesnego działania naprężenia stałego w środowisku korozyjnym mówimy o pękaniu korozyjnym.

Dotychczas w kraju wykonano próby ciśnieniowe, aż do rozerwania, dwóch walczaków: jednego nowego, a drugiego po przetworzeniu ok. 200 000 godzin – obydwa były wykonane ze stali miedziowej. Statyczne, wytrzymałościowe próby, wykonane na walczaku, nie wyjaśniły przyczyn powstawania pęknięć w czasie eksploatacji na krawędziach otworów leżących poniżej lustra wody, co świadczy, że pękanie krawędzi otworów, w danym wypadku, nie jest związane z działaniem naprężeń statycznych.

Analiza wyników wykonanych badań niszczących nie wykazała wpływu na zmiany własności wytrzymałościowych metalu walczaków – bez względu na pochodzenie i gatunek stali. Osobliwość otrzymanych charakterystyk wytrzymałościowych metalu ze wzrostem czasu pracy elementu uwarunkowana jest widocznie własnościami wytrzymałościowymi i strukturą metalu w stanie wyjściowym.

Wyniki badań udarności wykazują, że skłonność walczaków wykonanych ze stali miedziowych do obniżenia odporności na kruche uszkodzenie (podwyższona na z czasem temperatura przejścia w stan kruchy) uwidacznia się w dużym rozrzucie wartości udarności nawet w stanie wyjściowym stali. Brak istotnych zmian własności wytrzymałościowych i struktury długo eksploatowanych elementów jest jeszcze jednym dowodem na to, że zmiany te mogą zachodzić w małych objętościach materiału, co jest charakterystyczne dla niszczenia zmęczeniowego. Materiał walczaków, których obliczenia grubości ścianki wykonane są dla naprężeń statycznych, pracuje w warunkach zmęczenia, czego, prawdopodobnie, nie wiedzieli zwolennicy wykonania niszczących prób statycznych.

W krajowej energetyce pracuje ponad 200 walczaków dostarczonych przez różnych producentów i wykonanych z różnych gatunków stali, począwszy od węglowych, aż do stopowych z dodatkiem miedzi. Większość z nich przetworzyła dotychczas 200 000, a nawet grubo ponad 250 000 godzin i została porażona pęknięciami krawędzi otworów i mostków umieszczonymi poniżej lustra wody, a szczególnie otworów rur opadowych, parownika i armatury.

Dane doświadczalne (badania) oraz literatura za przyczynę tego rodzaju uszkodzeń uważają zmęczenie korozyjne w wyniku cyklicznej zmiany naprężeń działających na metal w środowisku agresywnym (woda kotłowa).

Do podstawowych procesów cyklicznych powodujących zmęczenie należą:

- | | | |
|--|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • udary cieplne, • próby ciśnieniowe, • uruchomienie z różnych stanów, • wahania temperatur wody kotłowej w czasie pracy stacjonarnej | } | <p>zmęczenie małocykliczne</p> <p>zmęczenie wielocykliczne (cykle temperaturowe)</p> |
|--|---|--|

Doświadczenia wykazują, że liczba zmian (wahań) temperatury wody zasilającej $\Delta t \pm 20^\circ\text{C}$ wynosi 17-20 cykli/h, rzeczywista liczba tego rodzaju cykli w czasie pracy kotła może osiągnąć 2×10^6 .

Na sumaryczne wyczerpanie metalu składają się degradacje wywołane zmęczeniem małocyklicznym i wielocyklicznym, co wyrażane jest procentowo jako suma warunków trwałości. Według danych literaturowych dopuszczalna liczba cykli w czasie wieloletniej pracy walczaka nie powinna przekraczać:

- zmęczenie małocykliczne – 3000 cykli (ze współczynnikiem bezpieczeństwa $\beta = 6$),
- zmęczenie wielocykliczne – $\max(1,6 - 2,0) \times 10^5$ cykli.

W przypadku pracy metalu w temperaturze przekraczającej 400°C mogą występować niekorzystne zmiany w strukturze obniżającej dalszą jego przydatność (obniżenie FATT i udarności). Zmęczenie korozyjne często skutkuje wzrostem szybkości rozprzestrzeniania się pęknięć w porównaniu z czystym zmęczeniem.

Przyrost prędkości rozwoju pęknięć zależy od gatunku stali, rodzaju środowiska, parametrów mechaniczno-metalurgicznych, wielkości obciążenia, częstotliwości zmian. Wg danych literaturowych środowisko ciekłe jest bardziej agresywne od gazowego.

Istniało przypuszczenie, że ze wzrostem przetworzonej liczby godzin, szczególnie w temperaturach powyżej 350°C , stale walczakowe, węglowe i stopowe mają skłonność do degradacji wytrzymałości, a szczególnie do obniżenia podatności na odkształcenie, co objawia się m.in. obniżeniem udarności KV i wzrostem temperatury przejścia metalu w stan kruchy. Przeprowadzone liczne badania niszczące próbek pobranych z obecnie eksploatowanych walczaków jak również z zeżłomowanych oraz poddanych próbom rozerwania w sposób jednoznaczny nie potwierdziły istotnych zmian własności mechanicznych po przetworzeniu ponad 200 000 godzin (tab. 1, rys. 1).

Ważną charakterystyką materiału walczaków i jego skłonności do kruchych uszkodzeń jest temperatura przejścia w stan kruchości.

Problem wytrzymałości na kruche uszkodzenia metalu komplikuje się tym, że zmienia się z czasem eksploatacji i krytyczne temperatury kruchości ulegają podwyższeniu, co jest wynikiem temperaturowego starzenia oraz nagromadzenia cyklicznego wyczerpania w temperaturze przekraczającej $t > 40^\circ\text{C}$.

Dla stali typu K22 temperatura krytyczna kruchości wynosi $10 - 40^\circ\text{C}$, dla stali stopowych temperatura krytyczna mieści się w zakresie $40 - 50^\circ\text{C}$.

Charakterystyka zachowania udarności w zależności od przetworzonej liczby godzin zależy od struktury metalu, a zwłaszcza od ilości bainitu i odpuszczonego martenzytu, który zazwyczaj ma wyższą udarność niż bainit, w tych samych temperaturach. Za materiał przydatny do dalszej eksploatacji uznaje się taki, którego udarność dla próbek wyciętych w kierunku obwodowym dla temperatury pokojowej ($t_s = 20^\circ\text{C}$) jest wyższa ($KCV \geq 6 \text{ J/cm}^2$).

Analiza licznych wyników badań niszczących nie wykazała trwałych skłonności do zmiany własności wytrzymałościowych metalu walczaków wraz ze wzrostem czasu pracy. Szczegóły zachowania się, wytrzymałościowych charakterystyk metalu ze wzrostem czasu eksploatacji, uwarunkowane są poziomem własności wytrzymałościowych i struktury metalu w stanie wyjściowym.

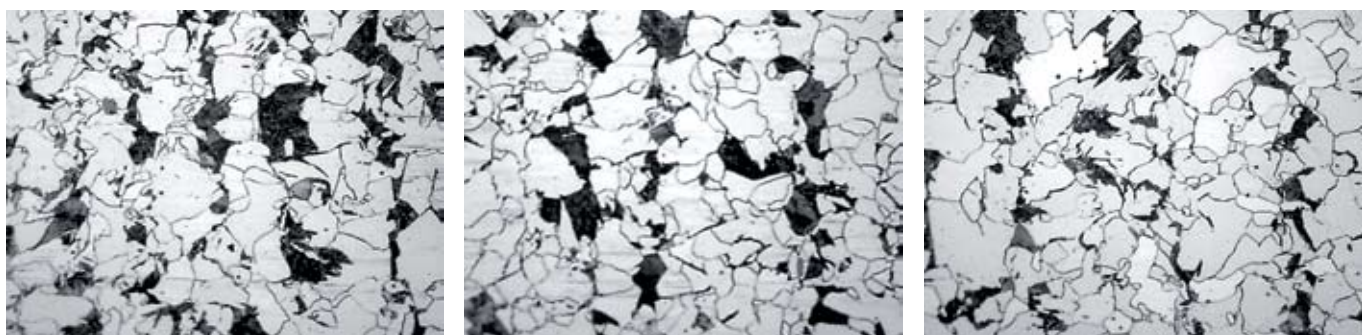
Według wyników badań niszczących, skłonność do obniżenia własności wraz z przetworzoną liczbą godzin jest niwelowana znacznym rozrzutem ich wartości w stanie wyjściowym dla różnych walczaków a, co gorsze, nawet dla różnych dzwon tego samego walczaka, bez względu na rodzaj zastosowanego materiału i producenta.

Obszar	Temp. badania, °C	R _e , MPa	R _m , MPa	Wydłużenie A5, %	Przewężenie Z, %	R _e /R _m
„A”	24	464	563	26	62	0,82
„B”		464	563	26	62	0,82
„C”		436	562	29	64	0,77
„A”	350	330	491	24	55	0,67
„B”		330	491	24	55	0,67
„C”		330	482	24	57	0,68

Wg katalogów firmy Rheinrohr (producenta blachy) minimalne wartości granicy plastyczności oraz wytrzymałości na rozciąganie wynoszą:

R_e = 340 MPa i R_m = 470 – 560 MPa dla temperatury otoczenia

R_e = 250 MPa dla temperatury 350°C



Rys. 1. Struktura w obszarach A, B, C – jak w stanie dostaw [7]

Warunki powstawania pęknięć zmęczeniowych na walczaku

Istnieje cały szereg teorii na temat przyczyn powstawania pęknięć porażających przyotworowe wewnętrzne powierzchnie walczaka umieszczone poniżej lustra wody.

Cykliczne zmiany naprężenia powodowane są licznymi uruchomieniami, próbami wodnymi oraz zmianami temperatury ścianki w stanach ustalonych w wyniku częstej zmiany temperatury wody kotłowej i zasilającej oraz termosoków. Jak już wspomniano, porażeniu ulegają powierzchnie przyotworowe znajdujące się w przestrzeni wodnej, a nigdy te, które znajdują się w przestrzeni parowej. Ponieważ w czasie stacjonarnego reżimu pracy kotła metal ścianki górnej i dolnej części walczaka pracuje przy identycznych temperaturach i ciśnieniu, to proces niszczenia przyotworowych powierzchni powinien być identyczny – a tak się nie dzieje.

Przyczyną pojawienia się pęknięć w metalu są różnice w ciepłno–mechanicznych warunkach pracy, np. rur opadowych oraz odprowadzających parę w czasie zmiany obciążenia w innych stanach niestabilnych. Nie wdając się w szczegółowe obliczenia ciepłne jedno można stwierdzić, że współczynnik przenoszenia ciepła w rurach opadowych jest wyższy niż w objętości walczaka, co jest związane z tym, że masowa prędkość czynnika w rurach opadowych jest większa niż w odprowadzających parę o wielokrotność cyrkulacji. Jednocześnie, przy identycznych masowych prędkościach, współczynnik wnikania ciepła od wody do ścianki rury jest

znacząco większy od współczynnika wnikania ciepła od pary. Różnice we współczynnikach przewodzenia w rurach opadowych i w objętości walczaka można wyjaśnić różnicą prędkości czynnika w nich płynącego.

Nieznaczne wymuszenie zmiany w obwodzie cyrkulacji czynnika powoduje, niejednokrotnie, zmiany temperatury w rurach opadowych jak i w rurach odprowadzających parę i w objętości czynnika w samym walczaku.

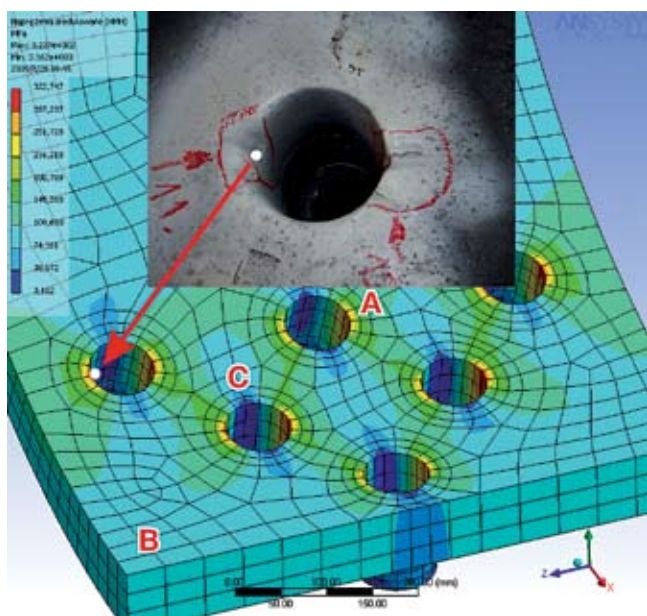
W czasie zmiany obciążenia na turbogeneratorze zachodzi zjawisko nienadążania wydajności kotła nawet w wypadku pracy układu w reżimie automatycznym. Proces ten zależy od dynamicznej charakterystyki regulacji obciążenia, co powoduje obniżenie ciśnienia w walczaku, a tym samym obniżenie temperatury nasycenia w konsekwencji skutkujące obniżeniem temperatury króćców rur opadowych, szczególnie w okolicach spoin łączących rury z walczakiem.

Biorąc pod uwagę fakt, że w znacznej liczbie elektrowni główne urządzenia regulacyjne nie zawsze są sprawne i regulacja odbywa się „na rękę” spadki ciśnienia mogą osiągać znaczne wielkości, a różnice temperatury powodować przekraczanie wartości dopuszczalnych. (Nie wyklucza się, że w związku z powyższym przyczyną powstawania pęknięć w dolnych częściach walczaków może być prędkość obniżania ciśnienia kotła w czasie odstawienia).

W czasie zatrzymywania kotła przy wyłączeniu zabezpieczeń wykonuje się szereg operacji, tj. zamknięcie głównej zasuwy i otwarcie odpowietrzeń, co powoduje nagłe obniżenie ciśnienia pary i jest powodem wrzenia wody kotłowej w walczaku,

w parowniku i rurach opadowych. Dzieje się tak, ponieważ w obiegu cyrkulacyjnym kotła woda nagrzana jest do temperatury nasycenia przy ciśnieniu roboczym, a przed momentem rozpoczęcia operacji odstawienia kotła para przedostaje się do rur przegrzewaczowych. W ten sposób w przegrzewaczach płynie para, a w rurach opadowych wrząca woda; wymiana ciepła w rurach parowych odbywa się na drodze konwekcyjnej, a w rurach opadowych wymiana ciepła przy pęcherzykowym wrzeniu, dla którego współczynnik przyjmowania ciepła jest niewyznaczalny.

Na podstawie przybliżonych obliczeń oraz pomiarów temperatury ścianki walczków w stanach nieustalonych stwierdzono, że prędkość spadku temperatury ścianki na wewnętrznej powierzchni jest rzędu 4°C/min, co przekracza wartości zalecane przez dostawców kotłów. Na tej podstawie można wnioskować o obecności – występowaniu znacznych temperaturowych gradientów w otworach znajdujących się poniżej poziomu wody, gdzie zazwyczaj występują pęknięcia (rys. 2).



Rys. 2. Miejsca powstawania pęknięć zmęczeniowo-korozyjnych w ściance walczaka

Natomiast w czasie uruchamiania kotła ze stanu zimnego ma miejsce nagrzewanie ścianek od jakiegoś stanu wyjściowego do roboczego, które zachodzi stopniowo, ale które niekiedy może mieć charakter udaru cieplnego. Niestety unikanie tego rodzaju udarów w czasie uruchamiania jest niemożliwością, choćby dlatego, że rozpalanie wykonywane jest na palnikach rozpałkowych bez monitorowania temperatury ścianki walczaka.

Pomiary temperatury wykonywane w czasie uruchamiania kotłów na dolnych tworzących, a zwłaszcza na króćcach rur opadowych, wykazały, że szybkość nagrzewania króćców rur opadowych jest znacznie wyższa od dolnej połowy walczaka. Wg niektórych danych literaturowych skoki temperatury w strefie króćców rur opadowych mogą sięgać 55°C, co obrazuje wielkość mogących wystąpić naprężeń cieplnych, które sumując się z naprężeniami od ciśnienia powodują uszkodzenia zmęczeniowe.

Z powyższego wynika, że w celu zapobieżenia występowaniu pęknięć w dolnej części płaszczu walczaka w czasie stanów nieustalonych, a szczególnie w czasie uruchomienia, konieczne jest dotrzymanie dopuszczalnej różnicy między temperaturą wody kotłowej w rurach opadowych i temperaturą dolnej tworzącej walczaka.

Wnioski

- **Badania niszczące**
Wytrzymałość doraźna sprawdzona na próbkach pobranych z uszkodzonych i nieuszkodzonych walczków mieści się w granicach określonych normami, podobnie parametry charakteryzujące plastyczność materiału.
- **Badania metalograficzne (repliki)**
Badania nie wykazały istotnych niekorzystnych zmian strukturalnych mogących mieć wpływ na dalszą przydatność.
- **Wyczerpanie trwałości materiału walczaka** zachodzi na skutek cyklicznie zmieniających się naprężeń:
 - małocyklicznych (mechanicznych),
 - wielocyklicznych (cieplnych).
 Procesy zmęczeniowe zachodzą w niewielkiej jego objętości.
- **Uszkodzenia kruche** mogą wystąpić tylko wtedy, gdy:
 - istnieje inicjator pęknięcia o rozmiarze większym od krytycznego, a lokalne naprężenia mają charakter rozciągający,
 - temperatura metalu jest niższa od temperatury przejścia w stan kruchy.

Uwaga:

Na wniosek Pro Novum UDT opracował zalecenia odnośnie do sposobu wykonywania prób ciśnieniowych (temperatura metalu, ciśnienie, sposób podniesienia ciśnienia).

W eksploatacji należy unikać naprężeń $\sigma > 0,8 R_{et}$ (próby ciśnieniowe)

- **Ocena stopnia wyczerpania metalu walczaka** powinna być oparta na następujących rzeczywistych danych:
 - geometria,
 - temperatura ścianki,
 - różnica między temperaturą nasycenia wody kotłowej a temperaturą wody zasilającej (możliwie najmniejsza),
 - częstotliwość występowania zmian temperatury (mieszanie wody kotłowej i zasilającej),
 - temperatura ścianki na dolnej tworzącej.

Podsumowanie

Większość walczków w kraju i zagranicą ulega uszkodzeniom. Uszkodzenia w postaci pęknięć najczęściej porażają krawędzie otworów oraz mostki znajdujące się na dolnej tworzącej walczków.

Przyczyną uszkodzeń jest zmęczenie wywołane naprężeniami cieplnymi i mechanicznymi działającymi na metal w środowisku agresywnym.

Do naprężeń mechanicznych (z reguły małocyklicznych) można zaliczyć: próby ciśnieniowe, zmiany obciążeń, uruchomienia i odstawienia kotła, a do naprężeń cieplnych – częstotliwość i wielkość zmian temperatur między parą nasyconą a wodą zasilającą.

Ścianki walczaków liczone są bez uwzględnienia naprężeń zmiennych. Liczne badania niszczące, na próbkach pobranych z walczaków zełtomowanych (próby statyczne), nie wykazały istotnych zmian wytrzymałości zależnej od przepracowanej liczby godzin przez walczaki. Dane wytrzymałościowe mieszczą się w granicach rozrzutu własności podawanych w odpowiednich normach materiałowych. Badania nie wykazały istotnych, niekorzystnych, zmian strukturalnych mogących mieć wpływ na dalszą przydatność metalu. Stwierdza się jedynie, że stale przebywające w temperaturach powyżej 400°C mają skłonność podwyższania FATT i obniżania udarności w temperaturze postojowej. W czasie prób ciśnieniowych wskazane jest utrzymywanie temperatury metalu od wartości wyższej od temperatury przejścia w stan kruchy.

Bardzo niebezpieczne dla walczaka jest szybkie rozprężenie (odstawienie), powodujące szybki spadek temperatury ścianek i obniżanie poziomu wody, co z kolei powoduje zmianę gęstości i wzrost różnicy temperatury między parą nasyconą a wodą zasilającą.

Obliczenia stopnia wyczerpania metalu powinny być oparte na następujących rzeczywistych danych:

- geometria,
- temperatura ścianki, dolna i górna tworząca,
- różnica między temperaturą wody kotłowej a wody zasilającej,
- częstotliwość występowania zmian temperatury (mieszania wody kotłowej i zasilającej).

Uwaga:

Na wniosek Pro Novum UDT opracował wytyczne prowadzenia prób ciśnieniowych pozwalających unikać kruchych uszkodzeń. W czasie eksploatacji należy monitorować:

- temperatury w miejscach położonych na górnych i dolnych tworzących walczaka i utrzymywać w granicach dopuszczalnych $\Delta_t = 40\div 50^\circ\text{C}$;
- różnice temperatur między parą nasyconą a wodą zasilającą Δ_t max 20°C.

Walczak jest elementem naprawialnym (zmiany powodowane zmęczeniem występują w ograniczonych objętościach).

Naprawy w postaci frezowania nieciągłości i wypełnienia ubytków powinny być wykonane po rozpoznaniu i usunięciu przyczyn uszkodzeń.

Walczaki, których ścianki liczone są na naprężenia stałe w rzeczywistości pracują w warunkach działania naprężeń zmiennych. Wykonywanie prób ciśnieniowych aż do zniszczenia walczaka w świetle powyższego było nieporozumieniem technicznym. W celu oceny stanu walczaka konieczne jest monitorowanie temperatur na górnej i dolnej tworzącej oraz różnicy temperatur wody zasilającej i kotłowej.

Uwaga:

Uszkodzenia wywołane zmęczeniem małocyklicznym i termoszokiem mają z reguły znaczne głębokości aż do perforacji włącznie natomiast uszkodzenie powodowane zmienną częstotliwością temperatury między wodą zasilającą a temperaturą nasylenia charakteryzują się z reguły małymi głębokościami nie przekraczającymi 10 mm.

Wg TRD 301 grubość ścianki walczaka powinna być obliczana z uwzględnieniem naprężeń zmiennych.

LITERATURA

- [1] Trzesczyński J.: Kruche pęknięcia elementów bloku energetycznego, *Energetyka* 1991, nr 4
- [2] Zbroińska-Szczuchura E., Dobosiewicz J.: Całkowite zniszczenie walczaków kotłów parowych, *Energetyka* 1991, nr 4
- [3] Dobosiewicz J., Trzesczyński J.: Trwałość walczaków kotłów parowych, *Energetyka* 1991, nr 8
- [4] Harnas A., Kiełbus A.: Degradacja struktury materiału walczaka podczas długotrwałej eksploatacji, Krajowa Konferencja, Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, 22-25 września 1997
- [5] Zbroińska-Szczuchura E.: Przyczyny uszkodzeń otworów rur opadowych walczaków w niektórych typach kotłów, *Energetyka* 1998, nr 3
- [6] Zbroińska-Szczuchura E., Dobosiewicz J.: Zmiany własności mechanicznych metalu podczas ekspaltacji walczaków, *Energetyka* 2002, nr 2
- [7] Klepacki F.: Własności długo eksploatowanej miedziowej stali walczakowej. Konferencja *Pro Novum* „Diagnostyka i remonty urządzeń ciepłno-mechanicznych”, 2009
- [8] Salski M.: Próba usystematyzowania kryteriów oceny wpływu warunków długotrwałej eksploatacji na degradację płaszcza walczaka wykonanego ze stali zawierającej miedzi. UDT 2002, nr 4
- [9] Ješkov: O ważnych przyczynach trzęsimoobrazowania w barabanach parowych kotłów. *Elektrické Stancije* 2011, nr 9
- [10] Dobosiewicz J., Zbroińska-Szczuchura E.: Zmiany własności mechanicznych metalu podczas ekspaltacji walczaków, *Energetyka* 2002, nr 5
- [11] Węglowski A.: Monitorowanie pracy walczaka kotła OP-230. Systemy technologiczne i urządzenia energetyczne. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2010
- [12] TRD 301 Anlage 1 Rerechnung, „Berechnung auf Wechselbeanspruchung durch schwellenden Innendruck bzw. durch kombinierte Innendruck – und Temperaturänderungen”