



Ocena stanu technicznego i prognoza trwałości parowych na podstawie badań niszczących

inż. Krzysztof Brunné

Pro Novum sp. z o.o.

Streszczenie

Jednym z elementów krytycznych kotłów energetycznych o niewymuszonym przepływie czynnika jest walczak. Ponieważ walczak jest grubościennym elementem krytycznym pracującym poniżej temperatury granicznej, prognoza czasu jego eksploatacji jest niemal nieograniczona, o ile projektant dobrze dobierze grubość ścianki i owiercenie płaszczu oparte na R_{ct} materiału walczaka.

Ponieważ większość długo eksploatowanych walczaków przekroczyła umowną granicę 200 000 godzin pracy, w artykule omówiono na tle historycznym różne podejścia do określenia prognozy trwałości na podstawie analizy wyników badań nieniszczących i niszczących wykonanych na próbkach pobranych z krążków wyciętych z płaszczu walczaka. Przedstawiono także opracowane na podstawie wieloletnich doświadczeń własnych podejście Pro Novum sp. z o.o. do tego istotnego zagadnienia diagnostycznego.

Wstęp

Walczaki są jednym z najbardziej odpowiedzialnych elementów kotłów parowych. Jako krytyczny element grubościenny pracujący poniżej temperatury granicznej są projektowane w oparciu o granicę plastyczności przy obliczeniowej temperaturze pracy R_{ct} . Prognoza ich czasu eksploatacji jest niemal nieograniczona i uzależniona od sposobu ich zaprojektowania, tj. grubości i owiercenia ich płaszczu.

Większość uszkodzeń płaszczu walczaka występuje na krawędziach otworów znajdujących się poniżej lustra wody. Przyczyną tych uszkodzeń jest zmęczenie małocyklowe i wysokocyklowe. Zmiany w ciągliwości metalu powstałe na skutek zmęczenia występują w niewielkiej objętości.

Podstawowym warunkiem postawienia prognozy bezpiecznej długotrwałej eksploatacji walczaków jest, poza uwzględnieniem wyników badań i pomiarów diagnostycznych oraz obliczeń, znajomość historii eksploatacji. Informacje dotyczące prac remontowych i awarii wraz z warunkami dotychczasowej pracy urządzenia stanowią niezbędną część wiedzy o stanie technicznym elementu. W niektórych przypadkach uzupełnieniem tej wiedzy jest pobór próbek do badań niszczących. Pro Novum wielokrotnie korzystała z tego rozwiązania.

Opis problemu

W Polsce w latach osiemdziesiątych ubiegłego wieku z inicjatywy producentów kotłów przeprowadzono badania ma-

teriałowe (niszczące) na próbkach pobranych z walczaków. Wyniki badań jednoznacznie wskazały, że długotrwała eksploatacja nie ma wpływu na właściwości mechaniczne stali, z których wykonano walczaki. Na początku lat dziewięćdziesiątych miały miejsce dwie poważne awarie kotłów energetycznych związane ze zniszczeniem walczaków. Literatura techniczna opisywała również takie przypadki, które miały miejsce w innych krajach w Europie – uszkodzeniu uległo ok. 20 walczaków. Do ich uszkodzenia nie doszło podczas pracy, lecz w czasie prób ciśnieniowych przeprowadzanych w temperaturze otoczenia, a temperatura metalu wynosiła poniżej 20°C^[1-6].

Pro Novum sp. z o.o. brała bezpośredni udział w określaniu przyczyn awarii polskich walczaków, które uległy zniszczeniu. Przyczyną uszkodzeń były nagle pęknięcia kruche, które zapoczątkowały nieciągłości umiejscowione w okolicy otworu lub spoiny. Inicjatorami pęknięć były wady technologiczne i materiałowe oraz pęknięcia eksploatacyjne, które powstały na krawędziach otworów poniżej lustra wody^[7].

Nagle pęknięcie kruche może powstać przy jednoczesnym wystąpieniu trzech czynników:

- nagromadzeniu się w konstrukcji dużej energii sprężystej, gdy naprężenia nominalne nie przekraczają granicy plastyczności;
- obecności w metalu inicjatorów pęknięć, którymi mogą być nieciągłości powstałe podczas wykonania lub eksploatacji;
- skłonności materiału do kruchego pęknięcia, zależnej od jego własności mechanicznych, zwłaszcza od stosunku R_0/R_m , (gdy jest on mniejszy od 0,65) oraz od temperatury przejścia w stan kruchy FATT^[1].

Jak wykazały badania materiału uszkodzonych walczaków, temperatura przejścia w stan kruchy metalu wynosiła ok. T_{ko} 40°C. Jednym z ustaleń komisji awaryjnej badającej przyczynę zniszczenia walczaków była zmiana warunków przeprowadzenia prób ciśnieniowych, opisana w instrukcji, która została na wniosek Pro Novum zatwierdzona przez UDT i wprowadzona w życie^[8]. Nowymi podstawowymi warunkami przeprowadzania prób ciśnieniowych było:

- obniżenie ciśnienia ich przeprowadzania z 1,25 p_0 do 0,8 p_0 ,
- temperatura ścianek walczaka powinna być równomierna i nie mniejsza niż 50°C podczas trwania próby.

Warunkiem dopuszczenia do dalszej eksploatacji walczaka na czas dłuższy niż 200 000 godzin jest posiadanie wiedzy o stanie technicznym elementu. Poza informacjami wynikającymi z diagnostyki, remontów i modernizacji oraz historii eksploatacji konieczne jest określenie bezpiecznych warunków pracy elementu. W przypadku walczaka istotne jest precyzyjne określenie parametrów prób wodnych, a w szczególności temperatury metalu. Rzetelne ustalenie tych warun-

ków możliwe jest poprzez określenie parametrów charakteryzujących bezpieczną eksploatację: udarność i temperaturę przejścia w stan kruchy. W ostatnim czasie coraz częstszym wymaganiem dotyczącym kotłów energetycznych jest konieczność przeprowadzenia badań niszczących, a co za tym idzie, poboru próbki trepanacyjnej z materiału walczaka w trakcie remontu. Czy wykonane badania na próbce tego rodzaju są reprezentatywne dla całego walczaka?

Wycinki do badań niszczących

Z płaszcza walczaka pobierane są różnego rodzaju próbki, które można scharakteryzować w zależności od ich rozmiarów oraz sposobu poboru i dalszego postępowania. Rozróżnić można trzy podstawowe przypadki, w zależności od stanu walczaka po analizie wyników badań^[9]:

- **Walczak nie wymaga naprawy przez spawanie**
Pobranie z krawędzi otworu niewielkiej ilości materiału. Uzyskany materiał jest porównywalny z ubytkiem po wyszlifowaniu pęknięć wystarczający do określenia morfologii pęknięć i ewentualnych zmian w strukturze pod wpływem eksploatacji.
- **Walczak wymaga naprawy przez spawanie**
Próbki łódkowe z krawędzi otworu. Wycięcie próbki odbywa się tak, aby pobrany wycinek zawierał pęknięcie wykryte podczas badań (badania nieniszczące), a rozmiar próbki umożliwił wykonanie badań metalograficznych, określenie morfologii pęknięć, pomiar udarności i określenie temperatury przejścia w stan kruchy. Badania wytrzymałościowe można wyznaczyć na podstawie badań mikropróbek. Zaletą tego rodzaju próbek poza możliwością ich ewentualnego pobrania z każdej cargin walczaka jest uzyskanie materiału z miejsc najbardziej wyłożonych. Miejsce po wycięciu próbek wymaga naprawy przez spawanie, która była konieczna ze względu na stan techniczny elementu (wykryte pęknięcia). Naprawa walczaka nie obniża przydatności jego własności do dalszej eksploatacji.
- **Pobór próbki wymaga naprawy walczaka przez spawanie**
Próbki trepanacyjne w postaci krążka o średnicy ok. $\phi=120$ mm. Wycinek pozwala przeprowadzić badania wytrzymałościowe, pomiar udarności, określenie temperatury przejścia w stan kruchy oraz badania metalograficzne. Miejsce poboru próbki musi spełniać podstawowe warunki bezpośrednio związane z konstrukcją i geometrią walczaka:
 - wyniki obliczeń wytrzymałościowych;
 - konfrontacje wytypowanego miejsca poboru próbki na obiekcie z fizyczną możliwością jej wycięcia, obróbki otworu i wstawienia króćca bezpośrednio na obiekcie;
 - wykluczenie kolizji z konstrukcją separacji.

Warunki te ograniczają obszar możliwości poboru próbki, a pobranie materiału z miejsc najbardziej wyłożonych (krawędzie otworów) jest niemożliwe. Sposób naprawy walczaka poprzez wstawienie króćca powoduje pojawienie się miejsca potencjalnego uszkodzenia, ponieważ nowa spoina nowego króćca jest spoiną uszczelniającą, a nie wytrzymałościową. W energetyce są znane przypadki pojawienia się pęknięć w okolicy spoiny i otworu po pobraniu krążka, które doprowadziły do naprawy walczaka.

Miejsce poboru próbki

Wyniki badań niszczących wykonanych na próbkach pobranych z materiału walczaka powinny uzupełnić wiedzę na temat stanu technicznego elementu. Oznacza to, że miejsce poboru próbki powinno być jak najbardziej reprezentatywne dla danego obszaru. Sam sposób jej pobrania powinien być (w miarę możliwości) jak najmniej inwazyjny, a walczak nie powinien tracić swoich własności.

W ostatnim czasie Pro Novum, realizując pracę na jednym z bloków elektrowni, zgodnie z zapisami umowy zobligowane było do pobrania próbki trepanacyjnej z walczaka. Przed rozpoczęciem prac należało określić kryteria jej poboru. Jedynym realnym było pobranie próbki z najsłabszej cargin. Do określenia „najsłabszego ogniwa” przyjęto warianty^[10]:

- **Wariant I** – Na podstawie analizy danych zawartych w atestie producenta i retrospekcji na podstawie badań w latach poprzednich zostanie wytypowana blacha o najgorszych własnościach, z której wykonano carginę, zwłaszcza co do mikrostruktury, udarności, temperatury przejścia w stan kruchy oraz stosunku R_y/R_m ;
- **Wariant II** – Jeśli zostaną wykryte wskazania o charakterze pęknięć eksploatacyjnych podczas badań NDT, carginę, na której wykryje się ich najwięcej, zostanie uznana za najsłabszą;
- **Wariant III** – Jeśli nie zostaną wykryte wskazania o charakterze pęknięć eksploatacyjnych podczas badań NDT, najsłabsza carginę zostanie wybrana na podstawie analizy wyników badań metalograficznych przy pomocy replik i pomiarów twardości w miejscach ich wykonania.

W trakcie realizacji pracy po zakończeniu badań poeksploatacyjnych walczaka warianty zostały zweryfikowane:

- **Wariant I** – Dostępne atesty materiałowe były czytelne i identyfikowalne w stosunku tylko do jednej cargin;
- **Wariant II** – W trakcie badań nieniszczących na krawędziach otworów nie wykryto wskazań o charakterze pęknięć;
- **Wariant III** – Badania metalograficzne i pomiary twardości wykonane na każdej części walczaka w strefie wodnej i parowej nie wykazały zmian w strukturze.

Po konsultacji z UDT do badań niszczących wytypowano carginę na podstawie wariantu I – umożliwiający porów-



Ocena stanu technicznego i prognoza trwałości długo eksploatowanych

nianie wyników w stanie poeksploatacyjnym z atestem producenta (stan zerowy). Obliczenia wytrzymałościowe i opisane powyżej uwarunkowania pozwoliły na pobranie próbki w strefie wodnej pomiędzy otworami rur opadowych. Pobrano próbkę o średnicy $\phi=125\text{mm}$ i grubości ok. 100 mm.

Badania materiałowe

Na pobranym krążku wykonano badania niszczące według zakresu uzgodnionego z UDT:

- analiza składu chemicznego,
- badania metalograficzne,
- pomiary twardości,
- pomiar udarności (KCU2 – możliwość porównania wyniku z atestem),
- ustalenie temperatury przejścia w stan kruchy (KCV),
- statyczna próba rozciągania w temperaturze pokojowej,
- statyczna próba rozciągania w temperaturze 350°C.

Pobranie tak okazałej próbki nie tylko umożliwiło wykonanie badań według założonego zakresu, dodatkowo w próbkę został wkomponowany kształt odpowiadający typowej próbce łódkowej, na której równolegle wykonano badania. Badania wytrzymałościowe ze względu na rozmiar próbki łódkowej zostały wykonane na mikropróbkach. Badania te wykonano zgodnie z obowiązującymi normami. Wyniki przedstawiono w tabelach obok w korelacji z atestem materiałowym i normą opisującą wymagania dla blachy walczaka, z której go wykonano^[11]. Badania wykonano na próbkach poprzecznych.

ANALIZA SKŁADU CHEMICZNEGO

Przeprowadzona analiza składu chemicznego potwierdziła gatunek stali 18CuMNT. Wyniki przedstawiono w tabeli 1.

BADANIA METALOGRAFICZNE WRAZ Z POMIARAMI TWARDOŚCI

Badania metalograficzne zostały wykonane na próbkach pobranych z całej grubości ścianki walczaka. W wszystkich przekrojach (W, S, Z) występuje pasmowa struktura ferrytyczno-perlityczno-bainityczna. Przykładowe obrazy struktury przy powierzchni wewnętrznej przedstawiono w tabeli 2.

Zmierzona twardość materiału mieści się w zakresie 220÷242HV30. Norma wytwórcza na blachy nie podaje wy-

maganych wartości twardości, w atestach natomiast wartości twardości są nieczytelne.

POMIAR UDARNOŚCI I TEMPERATURY PRZEJŚCIA

W STAN KRUCHY

Według normy BN-66/0642-12 podana została wartość KCU2. Dlatego w przeprowadzonych badaniach próbki udarnościowe miały karb U, co pozwoliło porównać wartości z normą i atestami (tabela 3). Wyniki wykazały, że otrzymane wartości próby udarnościowej spełniają wymagania normy.

Przytoczone dokumenty bazowe nie zawierają informacji dotyczących temperatury przejścia w stan kruchy. Wyniki naszych badań przedstawiono w tabeli 4. Temperatura przejścia w stan kruchy metalu przy powierzchni wewnętrznej walczaka wynosi 49°C.

	KU2	KCU2
	[J]	[J/cm ²]
Norma BN-66/0642-12	–	70
Atest materiałowy	–	95
Próbka pobrana z krążka – powierzchnia wewnętrzna/próbka łódkowa	84	105
Próbka pobrana z krążka – środek	72	90
Próbka pobrana z krążka – powierzchnia zewnętrzna	80	100

Tabela 3

Temperatura badania [°C]	KV [J]	KCV [J/cm ²]	TK [°C]
Próbka pobrana z krążka – powierzchnia wewnętrzna/próbka łódkowa			
25	16	20	~49
60	32	40	
95	80	100	
Próbka pobrana z krążka – środek			
25	38	47,5	~13
5	20	25	
-20	10	12,5	
Próbka pobrana z krążka – powierzchnia zewnętrzna			
25	18	22,5	~38
60	42	42,5	
95	48	60	

Tabela 4

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Mn+Ni
	%									
Norma BN-66/0642-12	max 0,20	0,30 0,50	0,70 1,00	max 0,04	max 0,04	max 0,3	0,25 0,32	1,00 1,20	0,90 1,20	1,80 2,10
Atest materiałowy	0,15	0,48	0,86	0,014	0,013	0,19	0,28	1,06	0,95	1,92
Próbka pobrana z walczaka	0,139	0,518*	0,976	0,010	0,004	0,22	0,28	1,06	1,08	2,04

Tabela 1 * - wartość Si mieści w odchyłce dopuszczonej w normie

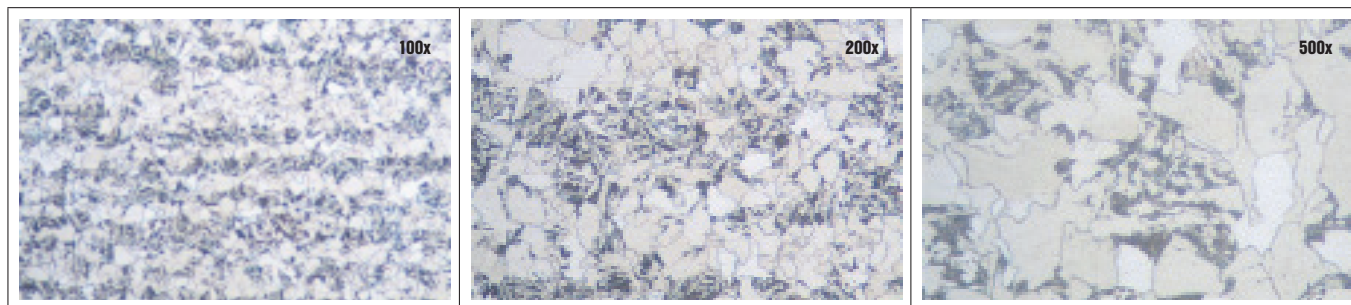


Tabela 2

STATYCZNA PRÓBA ROZCIĄGANIA

Wyniki statycznej próby rozciągania w temperaturze pokojowej i podwyższonej przedstawiono odpowiednio w tabelach 5 i 6. Dodatkowo badania wytrzymałościowe przeprowadzono na mikropróbkach zgodnie z normą PN-EN ISO 6892. Otrzymane wyniki wykazały, że otrzymane wartości prób wytrzymałościowych spełniają wymagania normy.

Podsumowanie wyników badań

Płaszcz walczaka został wykonany ze stali gatunku 18CuMNT. Wyniki przeprowadzonych badań metalograficznych wykazały strukturę ferrytyczno-perlityczno-bainityczną w całym badanym obszarze bez oznak jej degradacji. Własności wytrzymałościowe stali są znacznie wyższe od wartości zalecanych w normie. Temperatura przejścia w stan metalu walczaka wynosi 49°C (brak danych dotyczących tego parametru w atęcie).

Wnioski

Ze względu na brak pełnych informacji o stanie zerowym materiału zawartych w atęcie nie można jednoznacznie stwierdzić, czy po długotrwałej eksploatacji następuje spadek jego własności.

Badania wykazały, że:

- jednoznaczne i pełne informacje o własnościach wytrzymałościowych materiału walczaka można uzyskać z próbki łódkowej - ilość materiału jest wystarczająca i można ją pobrać z obszaru o największym wyęzieniu (Potencjalne Strefy Uszkodzeń - PSU);
- dotychczasowe podejście Pro Novum sp. z o.o. mówiące o tym, że próbki do badań niszczących należy pobierać tylko wtedy, gdy walczak wymaga naprawy przez spawanie, jest w pełni merytorycznie uzasadnione;
- próbkę łódkową można pobrać z każdej cergi, co umożliwia, o ile jest to konieczne, określenie najsłabszej cergi i dobranie dla niej technologii naprawy walczaka;
- w przeciwieństwie do próbki trepanacyjnej, naprawa walczaka po pobraniu próbki łódkowej zapewnia jego szczelność jak w stanie zerowym.

Temperatura badania 20 °C	Re	Rm	Wydłużenie A	Przewężenie Z	R _v / R _m
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	—
Norma BN-66/0642-12	392	539 667	20	—	0,72
Atest materiałowy	485	602	22	—	0,80
Próbka pobrana z krążka - powierzchnia wewnętrzna	526	663	20	62	0,79
Próbka pobrana z krążka - środek	515	652	20	59	0,79
Próbka pobrana z krążka - powierzchnia zewnętrzna	536	664	22	62	0,80
Próbka pobrana z wycinka łódkowego (5mm)	520	665	25,6	63	0,78
Próbka pobrana z wycinka łódkowego (3mm)	515	669	26	63	0,78

Tabela 5

Temperatura badania 350 °C	Re	Rm	Wydłużenie A	Przewężenie Z	R _v / R _m
	[MPa]	[MPa]	[%]	[%]	—
Norma BN-66/0642-12	304	—	—	—	—
Atest materiałowy	397	—	—	—	—
Próbka pobrana z krążka - powierzchnia wewnętrzna	438	598	19	46	0,73
Próbka pobrana z krążka - środek	432	585	17,8	45	0,73
Próbka pobrana z krążka - powierzchnia zewnętrzna	446	603	20,8	48	0,73
Próbka pobrana z wycinka łódkowego (5 mm)	428	581	17,3	39	0,73
Próbka pobrana z wycinka łódkowego (3 mm)	464	589	13,5	44	0,78

Tabela 6

LITERATURA

- [1] J. Dobosiewicz, E. Zbroińska-Szczuchura, *Całkowite zniszczenia walczaków kotłów parowych* [w:] „Energetyka” 1991 nr 4.
- [2] J. Dobosiewicz, J. Trzeszczyński, *Trwałość walczaków kotłów parowych*, [w:] „Energetyka” 1991, nr 8.
- [3] J. Trzeszczyński, *Ocena stanu technicznego walczaków kotłów parowych. Część I: cel i zakres oceny* [w:] „Energetyka” 1991, nr 8.
- [4] J. Dobosiewicz, *Niektóre rodzaje uszkodzeń walczaków i zasady ich naprawy* [w:] „Energetyka” 1992, nr 9.
- [5] E. Zbroińska-Szczuchura, J. Dobosiewicz, *Uszkodzenia walczaków kotłów parowych* [w:] „Energetyka” 1993, nr 3.
- [6] J. Dobosiewicz, E. Zbroińska-Szczuchura, *Zmiany własności mechanicznych metalu podczas eksploatacji niektórych walczaków*, [w:] „Energetyka” 2002, nr 1.
- [7] Sprawozdanie Pro Novum sp. z o.o. nr 35/90.
- [8] Decyzja UDT nr 25/95.
- [9] J. Trzeszczyński, *Jak długo mogą pracować walczaki kotłów parowych?* [w:] „Energetyka” 1994, nr 11.
- [10] Opinia techniczna Pro Novum sp. z o.o. nr OT.65.1124/2015.
- [11] Sprawozdanie Pro Novum sp. z o.o. nr 91.3271/2015.