LITERATURA

[1] Trzeszczyński J.: Wybrane problemy modernizacji urządzeń cieplno-mechanicznych w krajowej elektroenergetyce. Materiały Konferencji „Problemy i innowacje w remontach energetycznych". PIRE 2000. Szklarska Poręba 28.11—1.12.2000
[2] Ociepka K., Ratajczak R.: Dotychczasowe doświadczenia oraz zamierzenia w zakresie remontów kotłów po ich modernizacji. Materiały III Sympozjum Eksploatacji i diagnostyka modernizowanych bloków energetycznych. Remonty. Wisła 27—28.09.2001
[3] Gębala S.: Strategia remontowa Elektrowni Jaworzno III. Tamże
[4] Dobosiewicz J.: Przedłużanie okresów międzyremontowych turbin i kotłów parowych. Tamże
[5] Trzeszczyński J.: Żywotność urządzeń cieplno-mechanicznych bloków energetycznych po ich modernizacji. *Energetyka* 2000, nr 12
[6] Гладштейн В.И.: Влияние длительной наработки на жароирочность металла литых корпусов арматуры и турбин высокого давленя. *Теплоенергетика*. 2001, Но 4
[7] Laire CH., Eyckmans M.: Evaluating the Condition and Remaining Life of Older Power Plants. *VGB Power Tech.* 2001, nr 1
[8] Trzeszczyński J., Gębala S., Kucz J.: Możliwości wydłużania okresów międzyrewizyjnych części ciśnieniowych kotłów. Materiały Konferencji „Problemy i innowacje w remontach energetycznych". Polanica Zdrój 1999
[9] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 79.1200/2001, Program badań elementów ciśnieniowych bloku nr 4 dla sprawdzenia możliwości wydłużenia okresów międzyrewizyjnych. Katowice, wrzesień 2001 (nie publ.)

Ewa Zbroińska-Szczechura

Ocena stanu metalu rurek skraplaczy przez pomiar szybkości korozji

Korozja od strony wody rurek mosiężnych jest zjawiskiem elektrochemicznym i zachodzi w wyniku przepływu prądu między katodą i anodą przez elektronoprzewodzącą warstewkę ochronną (CuO_2). Odporność na korozję stopów miedzi zależy od stanu warstwy ochronnej (pasywnej), tj. od jej szczelności i grubości.

Skłonność do korozji elektrochemicznej mierzona jest potencjałem elektrodowym i może być wyrażona wartością siły elektromotorycznej (SEM) ogniw korozyjnych, które stanowią integralną część procesu korozji. Im większy jest potencjał [E] ogniwa, tym większa jest skłonność do zachodzenia ogólnej reakcji ogniwa. Należy zaznaczyć, że skłonność do korozji nie jest miarą szybkości reakcji elektrochemicznej.

Ponieważ bezwzględne wartości potencjałów elektrodowych nie są dokładnie znane umownie przyjmuje się, że potencjał standardowy reakcji:

$$H = 2H^+ + 2e^- \text{ (elektroda wodorowa)}$$

jest w każdej temperaturze równy zeru, stąd potencjał półogniwa dowolnej elektrody jest równy SEM ogniwa, którego drugą elektrodą jest elektroda wodorowa. Na tej podstawie przyjmuje się, że potencjał półogniwa dowolnej elektrody jest odniesiony do normalnej lub standardowej skali wodorowej.

Uporządkowanym zbiorem standardowych potencjałów jest szereg napięciowy metali i stopów. Wartości bardziej dodatnich potencjałów odpowiadają metalom bardziej reaktywnym. Istnieją różne czynniki, które zmieniają położenie pewnych metali w szeregu napięciowym. Bardzo istotnym czynnikiem jest skłonność metalu w warunkach utleniających do tworzenia określonych warstw powierzchniowych — pasywnych. Obecność takich warstw powoduje przesunięcie metalu w szeregu napięciowym w kierunku potencjałów ujemnych.

Metal wystawiony na działanie wody lub roztworów wodnych, kwasów i zasad (elektrolitów) koroduje w wyniku powstania ogniwa i przepływu prądów lokalnych.

W ogniwie galwaniczym katoda jest biegunem dodatnim (na katodzie zachodzi wydzielanie się metalu, reakcja redukcji). Elektroda, na której zachodzi reakcja chemicznego utleniania nazywana jest anodą (na anodzie zachodzi rozpuszczanie się metalu). Jeżeli w ogniwie galwanicznym płynie prąd, to potencjał anody rośnie a katody maleje. Dzięki temu zmniejsza się różnica potencjałów między elektrodami ogniwa. Jakość zmiany potencjału wywołanej prądem wypadkowym płynącym do lub od powierzchni elektrody wyrażona w woltach nazywa się polaryzacją. Mierzony potencjał metalu ulegającego korozji jest wypadkowym potencjałem spolaryzowanej katody i anody i znany jest jako potencjał korozyjny J_{kor}. Intensywność korozji w obszarach anodowych jest proporcjonalna do wielkości $J_{max} = J_{kor}$.

Szybkość korozji danego metalu można wyznaczyć znając wartość potencjału korozyjnego, stopień spolaryzowania i wartość potencjału anody lub katody, a szczególnie oporu polaryzacyjnego anody.

Opór polaryzacyjny nie jest oporem elektrycznym w obiegowym pojęciu. Opór określa nachylenie krzywej polaryzacji opisującej zależność przesunięcia potencjału elektrodowego metalu korodującego (anody) w kierunku ujemnym od stanu równowagi przy wzroście gęstości prądu korozji. Dla stopów miedzi liniowy odcinek krzywej

odpowiada $E \cong 10$ mV. W granicach tej wartości szybkość korozji jest odwrotnie proporcjonalna do oporu polaryzacyjnego. Pojęcie polaryzacji określa się zmianą potencjału elektrody w stosunku do jego wartości (w stanie równowagi roztwór wodny zawiera jony metalu), w przypadku gdy roztwór wodny nie zawiera jonów metalu, zachodzi proces korozyjny.

Potencjał elektrodowy — potencjał korozji ustala się na podstawie pomiaru różnicy potencjałów między elektrodą badaną a elektrodą odniesienia. Różnicę potencjałów między elektrodami mierzy się w obwodzie kompensacyjnym przy pobieraniu prądu z badanego ogniwa. Znając potencjał można obliczyć opór polaryzacji, np. metodą Sterna. Jest to jedna z metod elektrochemicznych pozwalająca wyznaczyć szybkość korozji. Metoda ta polega na polaryzacji próbki do niewielkich nadnapięć, rzędu 20 mV od potencjału stacjonarnego. W tym zakresie nadnapięć istnieje liniowa zależność między potencjałem próbki a gęstością płynącego przez nią prądu. Z nachylenia otrzymanej prostej można wyznaczyć opór polaryzacji, który związany jest bezpośrednio z gęstością prądu korozyjnego wg poniższego wzoru:

$$R_p = \frac{\beta_k \times \beta_a}{2{,}3 \cdot i_{kor}(\beta_k + \beta_a)}$$

gdzie:

β_k, β_a — współczynniki nachylenia prostych Tafela odpowiednio dla procesu katodowego i anodowego (w mV/dekadę prądu),

R_p — opór polaryzacji, w $\Omega \cdot cm^2$,

i_{kor} — gęstość prądu korozyjnego, w mA/cm^2.

Wyznaczone wartości współczynników Tafela dla procesu katodowego i anadowego wynoszą 200 mV/dekadę prądową. Podstawiając te wartości do powyższego wzoru otrzymamy prostą zależność wiążącą wartość oporu polaryzacji z gęstością prądu korozyjnego.

$$i_{kor} = \frac{44}{R_p}$$

Z podanej zależności wynika, że opór polaryzacji jest odwrotnie proporcjonalny do gęstości prądu korozyjnego. Jeśli wartości oporu polaryzacji podstawimy w $k\Omega \cdot cm^2$, a nie w $\Omega \cdot cm^2$, to wyznaczona wartość gęstości prądu korozyjnego będzie w jednostkach $\mu A/cm^2$.

Firma *Pro Novum* dokonała oceny stanu materiału rurek, po różnych czasach eksploatacji, wykonanych ze stopów miedzi MA77 i MC70. Wyniki pomiarów, po przepracowaniu skraplaczy w zbliżonych, ale różnych warunkach wodnych, ppodano w tabelach 1 i 2.

W tabelach przedstawiono wyliczone (z zależności Sterna) wartości szybkości korozji w jednostkach prądowych $\mu A/cm^2$.

Tabela 1

Średnie wartości oporów polaryzacji oraz odpowiadające im wartości gęstości prądu korozyjnego uzyskane dla kondensatorów ze stopów MA77

Oznaczenie miejsca badań	Opór polaryzacji R_p, $k\Omega \cdot cm^2$	Gęstość prądu korozji $\mu A/cm^2$	Szybkość korozji mm/10 tys. h
4K02 - L	29,1	0,435	0,03171
4K02 - P	37,1	0,341	0,02470
4K01 - L	34,9	0,362	0,02627
4K01 - P	46,6	0,272	0,01973

Tabela 2

Średnie wartości oporów polaryzacji oraz odpowiadające im wartości gęstości prądu korozyjnego uzyskane dla kondensatorów ze stopów MC70

Oznaczenie miejsca badań	Opór polaryzacji R_p, $k\Omega \cdot cm^2$	Gęstość prądu korozji $\mu A/cm^2$	Szybkość korozji mm/10 tys. h
4K01 - L	35,8	0,480	0,0357
4K01 - P	35,5	0,495	0,0369
4K01 - L	31,4	0,500	0,0397
4K02 - P	36,4	0,470	0,0355

Ubytek grubości ścianki wg danych eksploatacyjnych nie powinien przekraczać 80%, co przy najczęściej stosowanej grubości $g = 1$ mm wyniesie 0,8 mm. Po uzyskaniu tej wielkości ubytku rurki powinny być wymienione.

Przy wyliczonych wyżej (tab. 1, 2) prędkościach korozji (rurki przepracowały już ok. 20 tys. h) sumaryczny czas eksploatacji będzie wynosił dla MA77 250 tys. oraz dla MC70 220 tys. h. Uzyskane dopuszczalne czasy pracy są stosunkowo wysokie. Należy zwrócić uwagę na fakt, że z biegiem lat eksploatacji warunki pracy mogą ulec zmianie (woda, sposób konserwacji), dlatego konieczne jest okresowe mierzenie szybkości korozji i porównywanie z danymi uzyskanymi uprzednio. W przypadku jej wzrostu należy ustalić przyczyny.

Otrzymane różnice, dla tych samych warunków wodnych, w szybkości korozji stopów MA77 i MC70 są zgodne z danymi literaturowymi (stop MA77 charakteryzuje się większą odpornością na odcynkowanie). W omawianych przykładach warunków wodnych nie porównywano i nie wykluczone, że różnica w trwałości wymienionych stopów jest związana z jakością wody.

Podsumowanie

Przedstawiona metoda pomiaru oporu polaryzacyjnego stosowana w diagnostyce skraplaczy i wykonywana regularnie na tych samych rurkach, umożliwia ocenę i śledze-

nie zmian szybkości korozji, bez konieczności pobierania rurek do badań niszczących. Również wyniki pomiarów potencjału korozyjnego (stacjonarnego) dają informację o odporności korozyjnej rurek mosiężnych zastosowanych w danym skraplaczu, dla danych warunków wodnych.

Pomiar oporu polaryzacji jest czynnością, którą można wykonać podczas krótkiego postoju turbiny, zatrzymywanej np. w celu usuwania usterek na bloku i w związku z powyższym powinna być okresowo stosowana do oceny stanu rurek skraplaczy.

LITERATURA

[1] Uhling N. M.: Korozja i jej zapobieganie. WTN, Warszawa 1976
[2] Stern N. A.: Method of determining corrosion rates polarization data. *NACE*, 14 (1957)
[3] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 80.854/98 (nie publ.)
[4] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 72.958/99 (nie publ.)
[5] Sprawozdanie *Pro Novum* nr 96.1217/01 (nie publ.)
[6] Stubbe J, Briquet J.: *VGB Kraftwerkstechnik*, Vol. 69,7 (1989)

❑

Sławomir Rajca, Ewald Grzesiczek

Stan materiału kadłuba turbiny parowej po naprawie przez spawanie

Po długotrwałej eksploatacji (ponad 100 000 godz.) turbin parowych napotyka się uszkodzenia kadłubów w postaci pęknięć i deformacji. Pęknięcia najczęściej występują w strefach kadłuba pracujących powyżej temperatury 400°C, a ich liczba wzrasta ze wzrostem temperatury pracy metalu. Istnieją dwa rodzaje pęknięć:

- technologiczne — występujące w obszarze spoin naprawczych, karbów konstrukcyjnych i technologicznych,
- eksploatacyjne — (zmęczeniowe, termoszokowe) w obszarach wlotu pary, w sąsiedztwie karbów konstrukcyjnych i odwodnień.

Najczęściej spotyka się pęknięcia o charakterze technologiczno-eksploatacyjnym. W zależności od głębokości i lokalizacji pęknięć jest kilka możliwości postępowania:

- ❑ pozostawienie pęknięć bez ich usuwania (krótkie, płytkie pęknięcia poza strefami koncentracji naprężeń, towarzyszące podpowierzchniowym wadom odlewniczym),
- ❑ mechaniczne usuwanie pęknięć wraz „ze złagodzeniem" powstałych karbów,
- ❑ naprawa ubytków przez spawanie:
  - — „na zimno" z zastosowaniem elektrod wysokoniklowych,
  - — z obróbką cieplną po spawaniu elektrodami o składzie chemicznym stopiwa zbliżonym do składu materiału odlewu.

Niezależnie od wyboru któregokolwiek z wariantów naprawy należy mieć świadomość, że remont kadłuba nie został wykonany kompletnie. Po długotrwałej eksploatacji i doraźnych naprawach (lokalne napawanie ubytków po usuniętych pęknięciach, skrobanie płaszczyzn podziałowych) oraz towarzyszących eksploatacji sytuacjach awaryjnych (podanie „zimnej" pary, zła praca odwodnień, etc) kadłub na ogół jest w różnym stopniu zdeformowany, często utrudniającym normalny demontaż i montaż. Jeśli uwzględnić dodatkowo naprężenia wewnętrzne (poeksploatacyjne i spawalnicze), to można przyjąć, że począwszy od pewnego okresu eksploatacji (na ogół po 120 000—150 000 godzinach) kolejne remonty kadłuba w większym stopniu odsuwają problem jego naprawy niż go rozwiązują. Rozsądną alternatywą dla „klasycznych" napraw kadłuba jest rewitalizacja, niezbędna przede wszystkim wtedy, gdy oczekuje się eksploatacji turbiny w czasie dłuższym niż 250 000 godzin przy zapewnieniu nominalnej sprawności i wysokiej dyspozycyjności połączonej z redukcją kosztów remontowych.

Rewitalizacja [1—3] to zespół zabiegów polegających na:

- ❑ kompleksowej ocenie stanu technicznego kadłuba na podstawie:
  - o badań defektoskopowych (100% powierzchni wewnętrznych i zewnętrznych) po piaskowaniu lub śrutowaniu,
  - o niszczących badań materiałowych (mikrostruktura twardość udarność etc),
  - o pomiarów geometrii,
  - o obliczeń stopnia wyczerpania trwałości,
- ❑ usunięciu pęknięć powierzchniowych i napawaniu ubytków z zastosowaniem stopiwa o składzie zbliżonym do materiału odlewu,
- ❑ obróbce cieplnej kadłuba w piecu w celu:
  - o usunięcia naprężeń spawalniczych,
  - o usunięcia naprężeń poeksploatacyjnych,
  - o skorygowania geometrii,
  - o zregenerowania struktury w stopniu pozwalającym na poprawę własności plastycznych,
- ❑ obróbce mechanicznej wszystkich płaszczyzn i wytoczeń wymagających legalizacji,
- ❑ regeneracji gwintów.

Co najmniej dwie ważne cechy odróżniają rewitalizację od klasycznej naprawy:

- ▪ możliwość poprawy własności plastycznych kadłuba (wzrost udarności, obniżenie temperatury przejścia w stan kruchy),
- ▪ legalizacja płaszczyzn i wytoczeń korpusu wyprostowanego i odprężonego [3].