Jerzy Dobosiewicz, Ewa Zbroińska-Szczechura, Filip Klepacki
Pro Novum Sp. z o.o.

Uszkodzenia rurociągów obiegu zasilającego kotły i wężownic powierzchni ogrzewalnych pracujących poniżej temperatury granicznej

Damages of boilers feeding pipelines system and boilers heating surface pipe coils working below the temperature limit

Trwałość i niezawodność pracy urządzeń energetycznych, w warunkach progresywnego wzrostu mocy bloków i czasu ich eksploatacji, nabiera coraz większego znaczenia. Niezawodność pracy rur odgrywa tu rolę dominującą. Z kolei przydatność rur zależy od stanu wyjściowego materiału, operacji technologicznych, jakim zostają one poddane u wytwórcy (gięcie, spawanie, obróbka cieplna) i konstrukcyjnych rozwiązań oraz warunków eksploatacji.

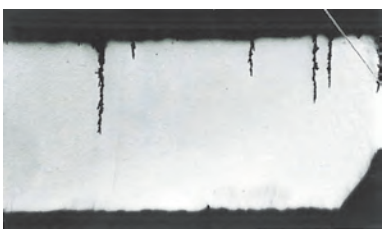
Przedwczesne zużycie metalu w urządzeniach jest szczególnie dotkliwie odczuwalne w energetyce.

Wykonywane w ostatnich latach w światowej energetyce badania i obserwacje ujawniły wiele przyczyn składających się na powstawanie nieprzewidzianych uszkodzeń. Jednym z wyników tych badań jest ujawnienie istotnej roli naprężeń cyklicznych – zginających – w elementach, które dotąd były liczone tylko na naprężenia statyczne pochodzące od ciśnienia.

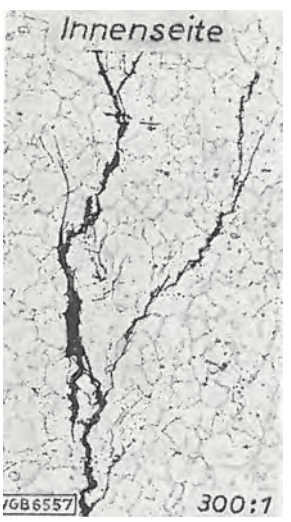
Często występującą przyczyną wyraźnego skrócenia czasu pracy elementów urządzeń cieplnych jest korozja zmęczeniowa, tj. specyficzne niszczenie metalu (pękanie) wskutek jednoczesnego działania naprężeń zmiennych i ośrodka agresywnego (korozyjnego). Powstająca w czasie eksploatacji szczelna warstwa tlenków na powierzchni metalu chroni go przed działaniem korozji. Jeżeli jednak naprężenia spowodują przerwanie tej warstewki, materiał zaczyna korodować. Warstewki powstające na powierzchni stali wskutek działania gorącej wody lub pary nasyconej to magnetyt. Jeżeli ich grubość wynosi 5 - 10 μm, to przy wydłużeniu o 0,1 – 0,3% następuje ich zniszczenie. Przy obciążeniu cyklicznym naprężenie potrzebne do zniszczenia warstewki jest mniejsze od statycznego. Gdy wskutek zmiennych naprężeń dochodzi do zniszczenia warstewki, odsłonięta stal koroduje nawet przy optymalnym składzie wody kotłowej. Tworzące się wtedy wżery, już w fazie początkowej, powodują koncentrację naprężeń, co jeszcze bardziej pogłębia proces niszczenia. Powstają wówczas idealne warunki do korozji elektrochemicznej, a intensywność jej wzrasta wraz z temperaturą oraz zawartością tlenu i jonów Cl^-, SO_4^{--}, OH^{--}, S^{--} itp.

Badania metalograficzne uszkodzonych elementów wykazały, że pęknięcia rozpoczynają się na wżerach korozyjnych (rys. 1) i rozprzestrzeniają się początkowo po granicach ziarna, a następnie poprzez ziarno. Obok pęknięcia głównego powstają rozgałęzione mikropęknięcia (rys. 2).

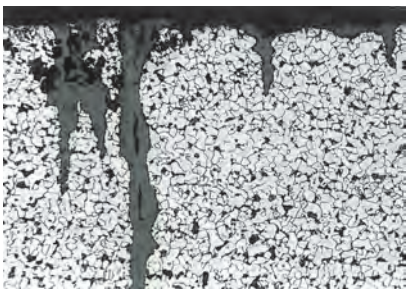
Pęknięcia zazwyczaj są zorientowane prostopadle do kierunku działania naprężeń i przyjmują kształt klinów wypełnionych produktami korozji (rys. 3). W miarę rozprzestrzeniania się kaskadowo uszkodzenia pęknięcie centralne łączy się poprzez łańcuch workowatych ubytków (rys. 4). Pęknięcia biorą początek na powierzchni wewnętrznej w obojętnej strefie kolana (rys. 5). Przełom ma charakter kruchy, często z widocznymi liniami spoczynku, charakterystycznymi dla zmęczenia (rys. 6).



Rys. 1. Poprzeczne pęknięcia propagujące od wżerów korozyjnych

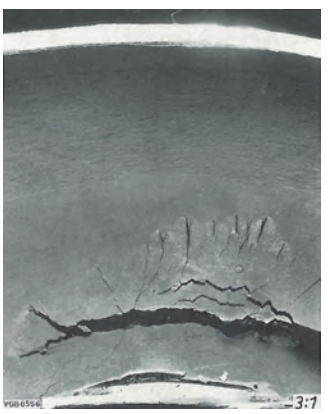


Rys. 2. Początkowa faza propagacji pęknięć po granicach ziarna [5]



Rys. 3. Uszkodzenia w postaci klinów wypełnione produktami korozji

Rys. 4. Pęknięcia główne z łańcuchem workowatych ubytków [1]



Rys. 5. Uszkodzenie na powierzchni wewnętrznej [3]

Rys. 6. Kruchy charakter przełomu

Przyczyną powstawania tego typu uszkodzeń jest praca metalu przy zmiennych naprężeniach w środowisku agresywnym. Źródłem naprężeń zmiennych w czasie eksploatacji mogą być naprężenia mechaniczne oraz pulsacje przepływu czynnika. Naprężenia mechaniczne powstają przy nadmiernej owalizacji kolan. Ujemny wpływ tych naprężeń zwiększa się ze wzrostem ich amplitudy i liczby cykli.

Środowiskiem agresywnym jest najczęściej: woda (kotłowa, zasilająca, kondensat, para nasycona). W warunkach panujących w urządzeniach energetycznych (ciśnienie, temperatura, pękanie warstwy ochronnej) staje się ona czynnikiem korozjotwórczym.

Agresywność wody wzrasta wraz z zawartością tlenu, soli (zwłaszcza chlorków i siarczków) oraz z odchyleniami od pH = 7. Istotny wpływ ma również jakość wody używanej do napełniania obiegu w postojach i do prób wodnych kotłów.

Na działanie korozji zmęczeniowej narażone są przede wszystkim kolana rur powierzchni ogrzewalnych i rurociągów komunikacyjnych pracujących w temperaturach niższych od granicznych.

Lokalizacja i charakter uszkodzeń

Uszkodzenia powierzchni wewnętrznej w postaci pęknięć podłużnych porażają najczęściej strefę obojętną wężownic oraz kolanek rurociągów wody zasilającej, mieszanki parowo-wodnej i pary nasyconej, pracujących poniżej temperatury granicznej dla danego gatunku stali. Ich przekroje poprzeczne wyraźnie odbiegają od kołowego. Uszkodzeniom tym nie towarzyszy odkształcenie średnicy rury, a złom ma charakter kruchy, niejednorodny, z licznymi pęknięciami wychodzącymi na powierzchnię.

Wszystkie pęknięcia są wypełnione produktami korozji. Na krawędzi pęknięcia zazwyczaj nie ma warstwy ochronnej. Metal rury w strefie uszkodzenia ma wyraźnie zmniejszoną plastyczność. Pęknięcie centralne ma rozwarte brzegi i przyjmuje kształt klina. Powierzchnia wewnętrzna uszkodzonych kolan pokryta jest wżerami. Charakter uszkodzeń jest typowy dla jednoczesnego działania dwóch czynników, tj.:

- naprężeń rozciągających, zmiennych,
- czynnika korozyjnego.

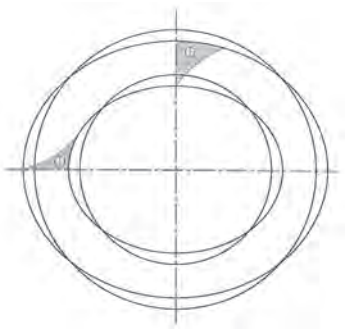
Przyczyny uszkodzeń

Obliczając naprężenia w powierzchniach walcowych zakłada się, że ich przekrój poprzeczny ma idealny zarys kołowy. Przy takim założeniu powstały wzory obliczeniowe do wyznaczania grubości ścianki rur. W rzeczywistych elementach ciśnieniowych, wykonanych z rur prostych, następnie giętych, mimo stosowania najnowszych technologii trudno jest uzyskać przekrój kołowy. Przekrój może przyjmować dowolne kształty, rozmaite pod względem symetrii i regularności, aż do braku obu tych cech łącznie.

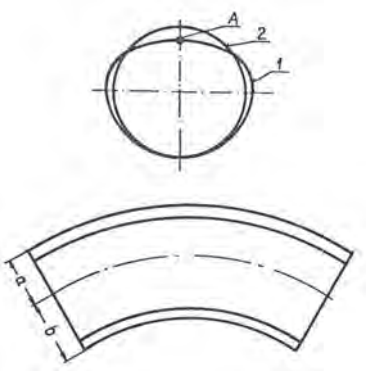
Podczas produkcji, w częściach giętych powstaje z reguły owalizacja i ścienienie ścianki, których stopień zależy od metody gięcia i wymiarów rury.

W rurach pracujących pod ciśnieniem wewnętrznym, które wywołuje odkształcenia przekroju poprzecznego występują dodatkowe naprężenia zginające, których wartość zależy od kształtu i wielkości zarysu oraz odchyłki przekroju kołowego (rys. 7).

W przekroju na łuku o małym promieniu (strefa obojętna gięcia) na ściance wewnętrznej występują naprężenia rozciągające. Największe naprężenia występują w miejscu przecięcia się dużej osi elipsy z obwodem rury (rys. 8).



Rys. 7. Rozkład naprężeń rozciągających na powierzchni wewnętrznej wywołanych owalizacją



Rys. 8. Odkształcenie przekroju kolana oraz zdefiniowanie odkształceń „a" i „b" uwzględnianych w obliczeniach

Ponieważ kierunek działania naprężeń zginających pokrywa się z kierunkiem działania naprężeń obwodowych, największe naprężenie obwodowe, i tym samym wytężenie materiału, wystąpi na ściance wewnętrznej, na łuku o najmniejszym promieniu. Dodatkowe naprężenia zginające dla przypadku zależności sinusoidalnej oblicza się wg wzoru:

$$\sigma_{zg} = \sigma_o \frac{3y}{g} \psi \qquad \text{kG/mm}^2 \qquad (1)$$

gdzie:

σ_o – naprężenie od ciśnienia wewnętrznego w rurze o przekroju kołowym, w kierunku obwodowym.

$$\sigma_o = \frac{p \cdot D}{200g} \qquad \text{kG/mm}^2 \qquad (2)$$

gdzie:

p – ciśnienie, MPa

D – znamionowa średnica, mm

g – grubość ścianki, mm

$$y = \frac{(D_{max} - D_{min})}{D_{max} + D_{min}} \qquad \text{mm} \qquad (3)$$

gdzie:

D_{max}, D_{min} – maksymalna/minimalna średnica zewnętrzna kolana

y – współczynnik charakteryzujący odchylenie przekroju kolana od kształtu kołowego.

Współczynnik ψ zależy do sztywności rury

$$\psi = \frac{1}{1 + \frac{p(1-\mu)D^3}{100E \cdot g^3}} \qquad (4)$$

gdzie:

E - współczynnik sprężystości

μ - współczynnik Poissona

Maksymalne wytężenie materiału w obojętnej strefie gięcia wyniesie więc

$$\sigma_c = \sigma_o + \sigma_{zg} \qquad \text{kG/mm}^2 \qquad (5)$$

gdzie:

σ_c – naprężenie całkowite

σ_o – naprężenie obwodowe

σ_{zg} – naprężenie gnące

Dopuszczalną owalizację przekroju można obliczyć z następującego wzoru:

$$A = 66{,}6 \ \frac{y}{D} \ \left(\frac{R_{et}}{\sigma_o} - 1\right)(1 + \psi) \qquad (6)$$

$$\sigma_o = \frac{p \cdot D}{200g}$$

gdzie:

R_{et} – granica plastyczności metalu w temp. pracy, MPa

σ_o – naprężenie obwodowe

y – współczynnik charakteryzujący odchylenie przekroju kolana od kształtu kołowego

D – znamionowa średnica, mm

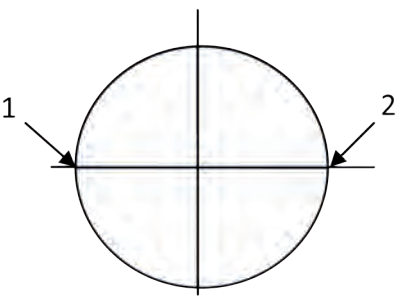
W pewnych wycinkach przekroju – wskutek nadmiernej owalizacji – naprężenia rzeczywiste (sumaryczne) przekraczają granicę plastyczności metalu rury i naprężenie dopuszczalne.

Ponieważ rzeczywisty przekrój kolana odbiega wyraźnie swym kształtem od elipsy, naprężenia te mogą być znacznie większe.

Ze względu jednak na brak możliwości określenia wpływu czynnika korozyjnego na pocienienie grubości ścianki i wzrost naprężeń owalizacja przekroju nie powinna przekraczać:

$$A_{dop} < 0{,}5A \qquad (7)$$

Największe względne naprężenie występuje na powierzchni wewnętrznej w punktach 1 i 2 zaznaczonych poniżej



Z analizy rzeczywistego kształtu przekroju charakteryzującego się brakiem deformacji półobwodu przy mniejszym promieniu gięcia kolana wynika, że faktyczną owalizację można opisać następująco:

$$A_{rzecz} = b - a \qquad (8)$$

gdzie:

b, a – wielkości podane na rysunku 8.

Ponieważ naprężenia działające w strefie obojętnej kolana na powierzchni wewnętrznej zależą od sumy naprężeń, to zmniejszanie jednego ze składowych naprężeń będzie miało istotny wpływ na podniesienie trwałości kolana. Naprężenie można zmniejszyć przez powiększenie grubości ścianki uwzględniając w obliczeniach wpływ owalizacji.

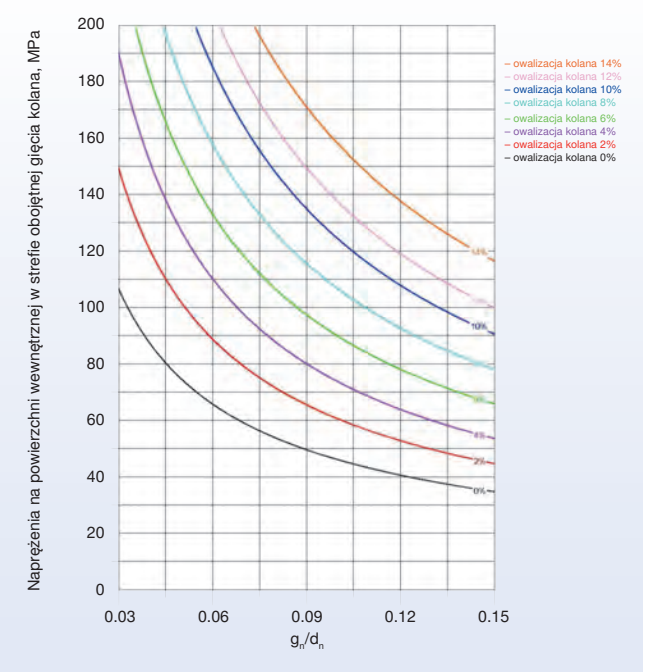
Dla rur giętych na zimno można zmniejszyć naprężenie własne i zwiększyć plastyczność metalu przez wyżarzanie odprężające. Badania tensometryczne wykazały, że owalizacja rury ok. 10% daje naprężenie własne o wartości 22 - 25 kG/mm^2. Suma wysokich naprężeń roboczych i własnych kolana o przekroju niekołowym oraz zmniejszona plastyczność metalu zwiększają jego potencjał elektrochemiczny, co prowadzi do powstawania na powierzchni wewnętrznej miejsc aktywnych anodowo. Metal w takim stanie, stykając się z wodą kotłową zawierającą sole (alkalia, chlorki) i tlen, ulega intensywnemu rozpuszczeniu.

Za bezpośrednią przyczynę uszkodzeń kolan rur z nadmierna opalizacją, pracujących w kontakcie z wodą kotłową lub zasilającą, należy uważać zmęczenie korozyjne. Proces niszczenia zachodzi w dwóch stadiach:

- okres stopniowego (mechaniczno – korozyjnego) powstawania na powierzchni metalu pierwotnych szczelin korozyjno-mechanicznych pod wpływem wysokich naprężeń rozciągających (niszczenie warstwy ochronnej) i rozwijania się w tych miejscach procesu korozyjnego (wżery-szczeliny w postaci klina - niszczenie metalu); trwa to dość długo poprzedzając rozpoczęcie właściwego pękania metalu; szczeliny powstają w płaszczyznach prostopadłych do kierunku maksymalnych naprężeń rozciągających i mogą rozprzestrzeniać się w początkowej fazie nie tylko wzdłuż granic ziarn, ale i przez poszczególne kryształy; pękanie śródkrystaliczne aktywizuje się pod wpływem czynnika mechanicznego, a międzykrystaliczne pod wpływem korozji;
- rozwój szczeliny następuje pod działaniem ciągle przebiegającego procesu elektrochemicznego, silnie intensyfikowanego działaniem naprężeń rozciągających; szybkość rozwoju szczeliny decyduje o sposobie niszczenia materiału; gdy szczelina zwiększa się przy przewadze czynnika mechanicznego, to ma charakter śródkrystaliczny i nie rozwijają się szczeliny równolegle, a jeśli przeważa czynnik korozyjny, to szybkość rozwoju pierwotnej szczeliny maleje i powstaje wiele szczelin równoległych o charakterze międzykrystalicznym, rozwijających się ze współmierną szybkością i dopiero w ostatniej chwili wzdłuż jednej z nich następuje rozerwanie.

Warunkiem powstania zmęczenia korozyjnego jest jednoczesne działanie - zwykle zmieniających się cyklicznie - naprężeń przekraczających granicę plastyczności metalu i środowiska czynnego chemicznie, „agresywnego". Wskaźniki chemiczne jakości wody zasilającej i kotłowej są szczytowym osiągnięciem istniejących ostatnio możliwości uzdatniania i nie ma obecnie sposobu ich poprawy. Skutki działania zmęczenia korozyjnego można ograniczyć jedynie poprzez zmniejszenie sumarycznych naprężeń w elementach giętych lub usunięcie kolan z nadmiernymi naprężeniami (owalizacją). Ponieważ naprężenie działające w strefie neutralnej zależy od sumy naprężeń składowych, zmniejszenie jednego ze składowych naprężeń będzie miało istotny wpływ na polepszenie trwałości kolana. Naprężenia od ciśnienia można zmniejszyć przez pogrubienie ścianki rury przeznaczonej do wykonania kolana, wprowadzając do wzoru na obliczenie grubości współczynnik uwzględniający owalizację.

Dopuszczalna owalizacja nie powinna przekraczać 10% dla rur o promieniu gięcia $2D_z \leqslant R \leqslant 5D_z$ oraz 4% dla rur o promieniu gięcia $R \geqslant 5D_z$. Dla kolana o promieniu $R = 305 = 4D_z$ dopuszczalna owalizacja wyniesie 5%, a o promieniu gięcia $R = 230 = 3D_z$ wyniesie 6,7%, a więc już leży w pobliżu wartości dopuszczalnej według wzoru. Opracowane przez *Pro Novum* wykresy dopuszczalnej owalizacji dla stali w zależności od g/D_z dla różnych ciśnień i temperatur pracy kotła i dla różnych materiałów podano na rysunku 9.



Rys. 9. Wartość naprężeń w zależności od owalizacji i stosunku grubości ścianki do średnicy kolana.

Jak już wspomniano, uszkodzenia zmęczeniowo–korozyjne powstają po dłuższym okresie eksploatacji, który na pewno związany jest z sumarycznymi naprężeniami występującymi w rurze, częstością ich zmian i agresywnością środowiska. Obecnie już wiadomo, że najszybciej uszkodzenia tego typu powstają na odgięciach rur ekranowych, kolankach rur podgrzewaczy wody, rurach opadowych i rurach układu zasilającego.

Przykład:

Rozerwanie kolanka rury wody zasilającej po przepracowaniu koło 150 000 godzin.

Przyczyną uszkodzenia były naprężenia zmienne przekraczające wartości dopuszczalne spowodowane nadmierną owalizacją przekroju kolana. Mechanizm powstawania pęknięć: zowalizowana rura w trakcie oddziaływania ciśnienia dąży do uzyskania kształtu koła, co pociąga za sobą każdorazowo przekraczanie naprężeń dopuszczalnych na powierzchni wewnętrznej rury, czemu w środowisku korozyjnym towarzyszy propagacja pęknięć.

Podsumowanie

Większość elementów kotła jest poddawana działaniom środowiska, w którym zachodzą procesy korozyjne, dlatego trwałość kolan zależny nie tylko od wielkości naprężeń, ale również od rozwoju procesów korozyjnych w metalu od strony powierzchni wewnętrznej. Wpływu korozji w czasie wieloletniej eksploatacji nie da się uniknąć i nie można jej ocenić.

Doświadczenia eksploatacyjne wykazały, że do uszkodzeń dochodzi w miejscu przejścia dużej średnicy elipsy zowalizowanej rury przez obwód koła; w tym miejscu na powierzchni wewnętrznej występują największe naprężenia i najszybciej rozwijają się procesy korozyjne.

Przy nieuniknionych wahaniach obciążenia (stany nieustalone) wskutek naprzemiennych odkształceń zostaje uszkodzona warstwa ochronna i pojawiają się stabilne wżery, mające wpływ na wzrost naprężeń, a następnie na formowanie się mikropęknięć. Dlatego wpływu korozji w czasie wieloletniej eksploatacji zowalizowanych kolan pominąć nie można. W miejscach pękniętej warstwy tlenków na skutek naprzemiennego działania naprężeń pojawiają się drobne pęknięcia, a nawet siatka pęknięć, ulegająca systematycznemu pogłębianiu się.

Mając powyższe na uwadze w czasie projektowania celowe jest ustalenie maksymalnego naprężenia, które można dopuścić w kolanie z uwzględnieniem działania procesów korozyjnych. Wartość naprężenia powinna być tak dobrana, aby przy nieuniknionych wahaniach ciśnienia (stany nieustalone) obciążane kolano w określonym czasie mogło pracować niezawodnie.

Naprężenia od ciśnienia na powierzchni wewnętrznej sumują się z naprężeniami od momentu zginającego i są liczone dla stanu sprężystego, ponieważ przy przejściu ze stanu sprężystego w plastyczny zachodzi wyrównanie przekroju i naprężenia spadają.

- Uszkodzenia na skutek zmęczenia korozyjnego porażają miejsce występowania to powierzchnia wewnętrzna w obojętnej strefie gięcia,
- Przyczyna: dwa występujące jednocześnie czynniki:
  - okresowe działanie wysokich naprężeń zmiennych,
  - obecność agresywnego czynnika.
- Naprężenia zmienne wywołane są występowaniem momentów zginających w zowalizowanym kolanie pod wpływem działania ciśnienia.
- Badania diagnostyczne na obecność pęknięć należy wykonywać: pierwsze - po 80 000 godzin, następne po każdych 60 000 godzin eksploatacji.
- Pomiary owalizacji należy wykonywać w terminie możliwie jak najkrótszym od czasu uruchomienia. Dopuszczalną owalizacja (wg wykresów) po przekroczeniu dopuszczalnej wskazanym jest sprawdzić badaniami ultradźwiękowymi (obojętne strefy gięcia kolan).

Wnioski i zalecenia

Wnioski

- Nadmierna owalizacja może być przyczyną niebezpiecznych uszkodzeń rur powierzchni ogrzewalnych i rurociągów, w których znajduje się woda, mieszanka parowo-wodna i/lub para nasycona.
- Jedną z przyczyn uszkodzeń rur pracujących poniżej temperatury granicznej może być korozja naprężeniowa.
- Korozja zmęczeniowa poraża elementy, których metal poddawany jest działaniu zmiennych, nadmiernych naprężeń w środowisku agresywnym (woda, mieszanka parowo-wodna, para nasycona),
- Naprężenia zmienne oraz ich przyrost występują na powierzchni wewnętrznej kolan w strefie obojętnej w przypadku, gdy kolana są zowalizowane.

Zalecenia

Po przepracowaniu pierwszych 80 000 godzin kolana rurociągów:

- obiegu zasilającego,
- do przegrzewacza wtórnego,
- z podgrzewacza wody do walczaka (kotłowego),
- rury opadowe

należy poddać badaniom nieniszczącym w następującym zakresie:

- wykonać pomiar owalizacji,
- przeprowadzić badania ultradźwiękowe na obecność pęknięć w przypadku, gdy owalizacja przekracza wartość dopuszczalną; wyniki odczytać na podstawie wykresów opracowanych przez *Pro Novum* – obliczonych metodą elementów skończonych dla stali ferrytyczno–perlitycznych w zależności od g/D_z dla różnych ciśnień, promieni gięcia i temperatur pracy dla różnych wymiarów i gatunków stali (rys. 9).

LITERATURA

[1] Dobosiewicz J.: Podłużne pęknięcia niektórych rur kotłowych. *Energetyka* 1974, nr 5

[2] Dobosiewicz J., Wojczyk K.: Trwałość kolan rurociągów parowych. *Energetyka* 1988, nr 3

[3] Parszyn A. A.: Powyszenije nadieżnosti nieobogriewajemych trub parogienieratorow. *Eniergomaszynostrojenije* 1975, nr 5

[4] Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania

[5] Urlich E.: Uber Festigkeit von Rohrbogen mit elliptischen Querschnitt bei Innendruck und zusätzlicher, Auffederung. *Mitt. der VGB*, 1960, nr 64

[6] Gujajew A.: Powrieżdienije gibow pieriechodnoj zony w kotłach PK-33-83 SP. Elektriczeskije Stancii 1968, nr 11

[7] Werner A.: O napriażenijach w gibach trub imiejuszczich owalnoje sieczienije. *Tiepło-energetika* 1970, nr 12

[8] Katz L.: Stresses in Pipes Bends. *Power Engineering* 1972, t. 76, nr 7

[9] Akschod M.: Korrozionno ustalostnyje rozruszenija gibow trub wodianogo ekonomajzerra. *Tieploenergetika* 1973, nr 1

[10] Wytyczne kontroli rurociągów i elementów powierzchni ogrzewalnych kotłów. Zjednoczenie Energetyki, czerwiec 1974

pro•novum® RESEARCH & TECHNOLOGICAL SERVICES Centrum Badawczo – Rozwojowe