

- [24] Magnucki K., Stasiewicz P.: Critical sizes of ground and underground horizontal cylindrical tanks. Elsevier: *Thin-Walled Structures*, **41**, 2003, 317-327.
- [25] Magnucki K., Malinowski M.: Geometria den walcowych kołowych naczyń ciśnieniowych. Komisja Budowy Maszyn PAN – Oddział w Poznaniu: *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji*, **23**, (1), 2003, 167-181.
- [26] Magnucki K., Stasiewicz P., Szczygłowski W.: Flexibly saddle support of a horizontal cylindrical pressure vessel. Elsevier: *Intl Journal of Pressure Vessels and Piping*, **80**, (3) 2003, 205-210.
- [27] Magnucki K., Malinowski M.: Cienkościenna żebrowana płaska przegroda zbiornika ciśnieniowego. *Przegląd Mechaniczny*, **7-8**, 2004, 23-27.
- [28] Magnucki K., Lewiński J., Stasiewicz P.: Optimal sizes of a ground-based horizontal cylindrical tank under strength and stability constraints. Elsevier: *Intl Journal of Pressure Vessels and Piping*, **81**, 2004, 913-917.
- [29] Malinowski M., Magnucki K.: Optimal design of a sandwich ribbed flat baffle plate of a circular cylindrical tank. Elsevier: *Intl Journal of Pressure Vessels and Piping*, **82**, (3), 2005, 227-233.
- [30] Magnucki K., Lewiński J., Stasiewicz P.: Optimal design of a ground-based horizontal cylindrical tank with ellipsoidal heads. PAN: *The Archive of Mechanical Engineering*, **LII** (1), 2005, 41-49.
- [31] Magnucki K., Sekulski Z.: Effective design of a bolted flanged joint with a flat ring gasket. PAN: *The Archive of Mechanical Engineering*, **LII** (3), 2005, 267-281.
- [32] Magnucki K., Malinowski M., Belica T., Dębowski D.: Wybrane zagadnienia połączeń kołnierzowych śrubowych urządzeń ciśnieniowych. PAN: *Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, **4**, (144), 2005, 105-119.
- [33] Magnucki K., Malinowski M., Lewiński J.: Optimal design of an isotropic porous cylindrical shell. *Proc. of the ASME Pressure Vessels and Piping Conference, PVP2006-ICPVT-11*, Vol. **3**, Design and Analysis, Vancouver, 2006, 345-352.
- [34] PD 5500, *Specification for unfired fusion welded pressure vessels*. BSI: London, 2005.
- [35] Spence J., Tooth A.S. (Eds) *Pressure vessel design, Concepts and principles*. E & FN Spon: London, 1994.
- [36] Stasiewicz P., Magnucki K.: Optimization of horizontal cylindrical pressure vessels under strength and stability constraints. In: *Pressure Vessels and Piping: Vol. I: Codes, Standards, Design and Analysis*, (Eds): B. Raj, B.K. Choudhary, K. Velusamy, Narosa Publishing House, 2009.
- [37] Stasiewicz P., Magnucki K.: Tightness sensitivity of a bolted flanged joint. Abstract Book: *The 12<sup>th</sup> Intl Conference on Pressure Vessel Technology, ICPVT-12*, Phoenix Island, Jeju, Korea, 2009, 31.
- [38] Teng J.G., Rotter L.M.: *Buckling of thin metal shells*. Spon Press, Taylor & Francis Group: London, New York, 2004.
- [39] Tian J., Wang C.M., and Swaddiwudhipong S.: Elastic buckling analysis of ring-stiffened cylindrical shells under general pressure loading via Ritz method. Elsevier: *Thin-Walled Structures*, **35**, 1999, 1-24.
- [40] Walker A.C., McCall S.: Experimental investigation of damaged stiffened cylindrical shells. Elsevier: *Thin-Walled Structures*, **30**, 1998, 79-94.
- [41] Warunki Techniczne Dozoru Technicznego. Urządzenia ciśnieniowe. *Obliczenia wytrzymałościowe*. DT-UC-90/WO-O. Urząd Dozoru Technicznego, Bydgoszcz, 1992.
- [42] Wittenbeck L., Magnucki K.: The numerical analysis of an orthotropic cylindrical shell. WILEY-VCH: *Proc. in Applied Mathematics and Mechanics, PAMM*, **8**, 2008, 10357-10358.
- [43] Wittenbeck L., Magnucki K.: Elastic buckling of orthotropic cylindrical vessel. Abstract Book: *The 12<sup>th</sup> Intl Conference on Pressure Vessel Technology, ICPVT-12*, Phoenix Island, Jeju, Korea, 2009, CD-Rom, pp. 99-100.
- [44] Ventsel E., Krauthammer T.: *Thin plates and shells*. Marcel Dekker, Inc.: New York, Basel, 2001.
- [45] Wempner G., Talaslidis D.: *Mechanics of solids and shells*. CRC Press: Boca Raton, London, New York, Washington, 2003.
- [46] Woźniak C.: (red.) *Mechanika sprężystych płyt i powłok*. Mechanika Techniczna, tom VIII, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2001.
- [47] Ziółko J.: *Zbiorniki metalowe na cieple i gazy*. Arkady: Warszawa, 1986.

**EWA ZBROŃSKA-SZCZECIURA**  
**JERZY DOBOSIEWICZ**  
**Pro-Novum Spółka z o.o.**

## Stosowane metody do oceny stopnia zużycia ciśnieniowych elementów kotłów i rurociągów pracujących w warunkach pełzania

### STRESZCZENIE

Podczas eksploatacji część elementów konstrukcyjnych urządzeń energetycznych pracuje w warunkach pełzania i ulega ciągłemu procesowi niszczenia. Obecnie, znaczna część elementów krytycznych, które pracują już ponad 100 000 h (projektowy czas pracy) a, niektóre z nich, nawet 240 000 h, daleka jest jeszcze od wyczerpania indywidualnej trwałości. Trwałość, w dużym stopniu, zależy od rodzaju ocenianych elementów, warunków eksploatacji, rozwiązań konstrukcyjnych i technologii ich wykonania oraz, procesów niszczenia, które zachodzą w miejscach najbardziej wyężonych i, jest zatem, umownym kompleksowym wskaźnikiem, stanowiącym połączenie wielu cech, zarówno struktury i własności mechanicznych materiału jak również, warunków wyężeniowych i eksploatacyjnych elementu konstrukcyjnego.

W opracowaniu przedstawiono metody oceny przydatności do dalszej eksploatacji elementów ciśnieniowych kotłów i rurociągów. Podstawą opracowania są: dane literaturowe, obliczenia trwałości oraz dotychczas wykonane badania diagnostyczne, jak również nowe dane dotyczące wytrzymałości czasowej i doświadczenia eksploatacyjne.

### 1. Wprowadzenie

Istnieją różne czasy określające trwałość elementów, a mianowicie:

- trwałość projektowa (liczona zazwyczaj na  $R_z = 100\ 000$ ),
  - trwałość nominalna (liczona wg EN na parametry nominalne oraz  $R_z = 250\ 000$ ),
  - trwałość indywidualna (liczona na  $R_z = 250\ 000$  i parametry rzeczywiste  $R_z$ ),
- Elementy ciśnieniowe kotłów (ogrzewane i nieogrzewane) ulegają zużyciu wskutek następujących procesów niszczących:
- ◆ pełzania,
  - ◆ zmiany struktury (obniżenie wytrzymałości czasowej),
  - ◆ ubytku grubości ścianki (korozja, erozja, termoszoki).

**Warunki pracy elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania (powyżej temperatury granicznej)**

#### ★ Przegrzewacze pary:

- **wężownice** – rury przegrzewacza pary wykonane, w zdecydowanej większości, ze stali 15HM i 10H2 M pracują powyżej temperatury granicznej tzn. w obszarze pełzania, korozji od strony pary

i spalin, korozji od zawilgoconego popiołu, korozji zmęczeniowej na powierzchni zewnętrznej; najczęstszą przyczyną uszkodzeń jest przegrzanie materiału (praca w temperaturze przekraczającej temperaturę obliczeniową) – uszkodzeniom od przegrzania często towarzyszą ubytki grubości ścianki wskutek korozji od strony spalin oraz od strony pary.

- **komory** – pracują w warunkach pełzania i zmęczenia cieplnego – uszkodzenia związane z pełzaniem, najszybciej pojawiają się przy wszelkiego rodzaju otworach (miejsca koncentracji naprężeń) na wewnętrznej powierzchni komór; mają postać odkształceń obwodowych, aż do pęknięć włącznie; pęknięcia są usytuowane równoległe do głównej osi komory; uszkodzenia zmęczeniowe od termoszoków (mogą wystąpić po bardzo krótkim czasie eksploatacji) mają postać pęknięć powierzchniowych na krawędziach otworów na powierzchni wewnętrznej lub w przypadku niewłaściwego rozmieszczenia otworów – pęknięć mostków z ukierunkowaniem obwodowym; w praktyce rzadko występują pełzaniowe uszkodzenia komór i mogą mieć miejsce w przypadku pracy powyżej temperatury obliczeniowej.

#### ★ Komory schładzaczy wtryskowych

Charakteryzują się podobnymi warunkami pracy i uszkodzeniami jak komory przegrzewaczy, ale mogą, ponadto, wystąpić pęknięcia na powierzchniach wewnętrznych w przypadku niesprawnych dysz lub popękanych koszułek ochronnych wskutek działania termoszoków.

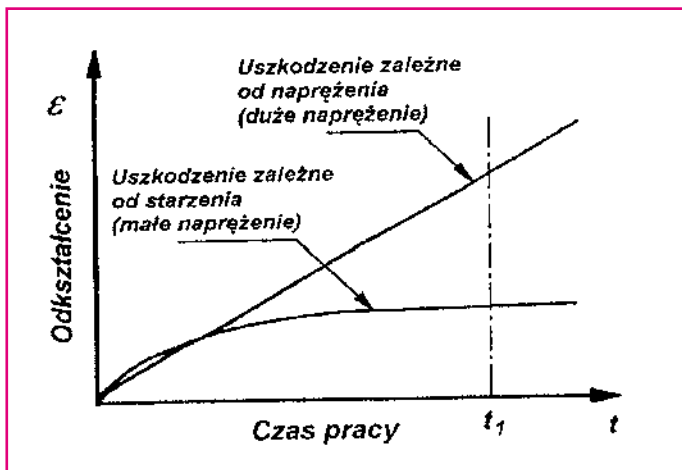
#### ★ Rurociągi

Pracują w warunkach pełzania i zmęczenia oraz korozji zmęczeniowej. Przyczyną większości uszkodzeń są pęknięcia spoin wywołane działaniem naprężeń dodatkowych, stałych (niewłaściwa praca zamocowań) oraz zmiennych (odchylenia od projektowej trasy oraz niewłaściwą kompensacją rozszerzalności cieplnej i niewłaściwą pracą zamocowań).

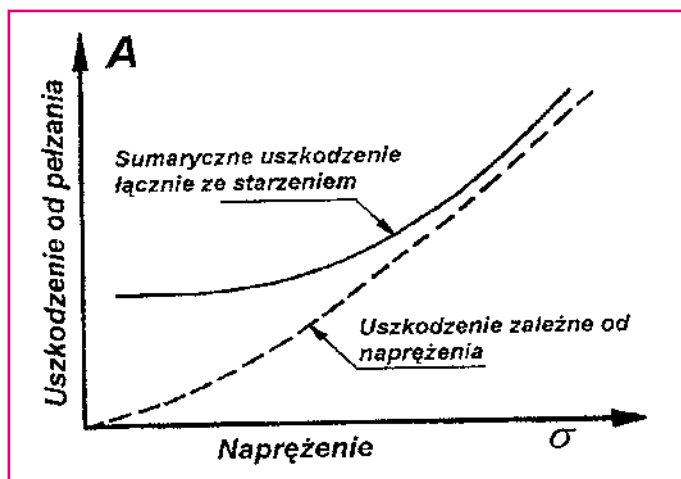
Przedwczesne wyczerpanie trwałości (pełzanie) występuje w skutek dodatkowych naprężeń spowodowanych owalizacją powstałą w czasie gięcia kolan oraz nieodpowiednią strukturą.

W niektórych elementach rurociągów mogą występować również procesy zmęczenia małowykłowego i mamy wtedy, do czynienia z łącznym działaniem obu rodzajów niszczenia. Znaczne różnice naprężeń (stan zamocowań i podparć) występujące zwykle w łukach rurociągów, w stosunku do odcinków prostych, powodują, że stopień degradacji materiału jest na ogół, większy, właśnie, w obszarze elementów kształtowych (dotyczy to również trójników i czwórników). Pęknięcia pełzaniowe występują na zewnętrznej powierzchni w strefie rozciąganej kolan rurociągów lub spoin. Na trwałość kolan rurociągów parowych pracujących w warunkach pełzania wpływają następujące czynniki:

- ◀ strukturalne – zmiany własności mechanicznych (zwłaszcza plastyczność) wskutek niewłaściwej obróbki cieplnej rur,



Rys. 1. Odkształcenia metalu w zależności od czasu pracy i naprężenia [2]



Rys. 2. Stopień uszkodzenia metalu w zależności od naprężenia [2]

- ◀ technologiczne – zmiany geometrii przekroju poprzecznego wynikające z nieodpowiedniej technologii gięcia,
- ◀ eksploatacyjne – korozyjne zmiany grubości ścianki i pęknięcia zmęczeniowo-korozyjne.

## 2. Typowe uszkodzenia

Większość uszkodzeń elementów pracujących w warunkach pełzania, a w tym szczególnie węzownic i niektórych rurociągów, spowodowana jest przegrzaniem materiału (praca w temperaturze przekraczającej projektową  $t_c$ ). Przegrzanie może nastąpić wskutek długotrwałego nieznacznego lub krótkotrwałego, lecz znacznego, przekroczenia temperatury 600°C.

Wpływ naprężenia i czasu pracy na niszczenie elementów przedstawiono na rys. 1 i 2. Rodzaje uszkodzeń przedstawiono na rys. 3÷5.

## 3. Zasady obliczeń konstrukcyjnych

Grubości ścianek elementów ciśnieniowych, w przypadku, gdy pracują poniżej temperatury granicznej, są liczone wg granicy plastyczności ( $R_{pl}$ ) a dopuszczalne naprężenie przyjmuje wartość  $k = \frac{R_{pl}}{1,65}$  – teoretycznie ich trwałość jest nieograniczona.

Wyraźne wyczerpanie pełzaniowe zachodzi w elementach liczonych wg wytrzymałości czasowej ( $R_t$ ) pracujących w temperaturach nadgranicznych. Temperatura graniczna jest to miejsce przecięcia się dwóch



Rys. 3. Uszkodzenia rurociągu komunikacyjnego (komora wylotowa przegrzewacza do schładzacza). Materiał 15HM, przepracowana liczba godzin 15 000 h,  $D_2/D_w < 1,3$  mm. Przyczyna przekroczenia obliczeniowej temperatury ścianki.



Rys. 4. Pęknięcia pełzaniowe, komora pary przegrzanej po przepracowaniu 130 000 h, materiał 10H2 M,  $D_z/D_w > 1,3$  mm, nieznaczne przekroczenie temperatury ścianki

krzywych  $R_{ct} = f(t)$  i  $R_z = f(t)$  przy uwzględnieniu odpowiednich współczynników (rys. 6).

Temperatura graniczna określona dla poszczególnych gatunków stali wg VGB

Gatunek stali	Temperatura w punkcie A
Niestopowe	400°C
Manganowe	410°C
17 MnMoV64	420°C
15NiCuMoNb5	420°C
15 Mo3	470°C
16 M	470°C
13CrMo44	480°C
15HM	480°C
10CrMo910	470°C
14 MoV63	500°C
13HMF	500°C
PT 91, 92	480°C

Z przepisów UDT, dotyczących obliczania wytrzymałości elementów ciśnieniowych pracujących w temperaturze nadgranicznej, wynika, że za dopuszczalne naprężenie należy przyjmować jedną z dwóch wartości:

$$K^{III} = \frac{R_{z(t_0)}}{1,65} \quad (1)$$

$$K^{IV} = R_{1(t_0)} \quad (2)$$

gdzie:

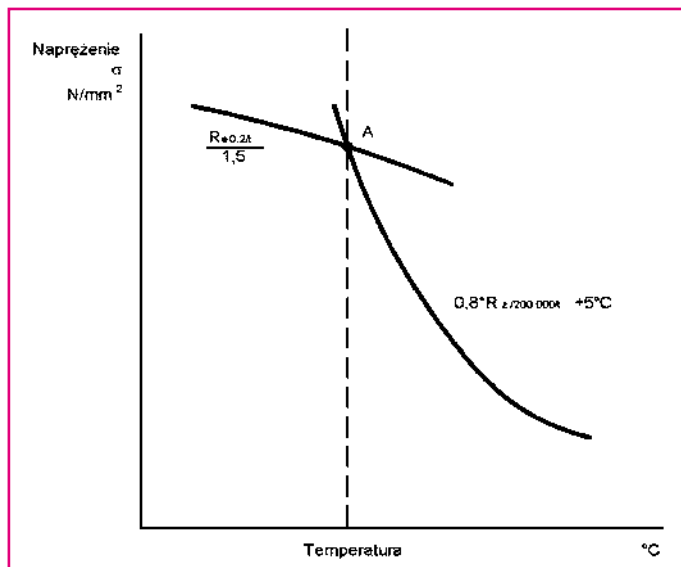
$R_{z(t_0)}$  – średnia gwarantowana wytrzymałość materiału na pełzanie w czasie ( $\tau$ ) przy temperaturze ( $t_0$ ),

$R_{1(t_0)}$  – średnia gwarantowana czasowa granica pełzania materiału przy 1-procentowym odkształceniu w czasie  $t$  przy temperaturze  $t_0$ .

Najczęściej dopuszczalne naprężenie jest określone wartością  $K^{III}$ ; wtedy wytrzymałościowy współczynnik bezpieczeństwa  $x_\sigma$  po przekroczeniu 100 tys. h pracy elementu wyniesie 1,65 i podczas dalszej eks-



Rys. 5. Pęknięcie rurociągu pary świeżej, kolano po przepracowaniu 150 000 h, materiał 13HMF,  $D_z/D_w > 1,3$  mm. Przekroczenie nominalnego czasu pracy.



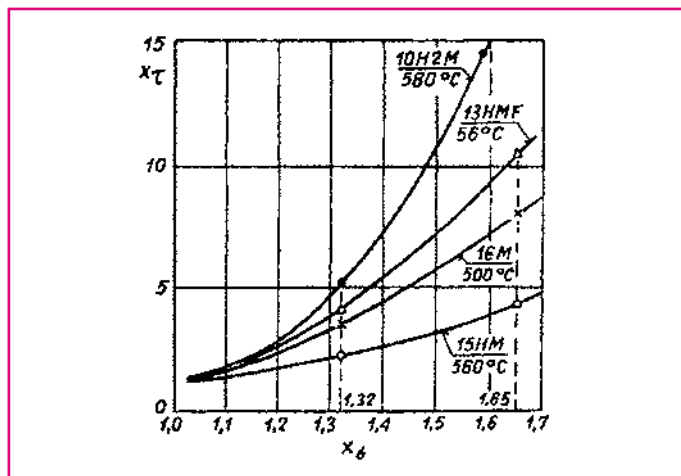
Rys. 6. Sposób wyznaczania temperatury granicznej wg VGB [1], gdzie;  $R_{\sigma t}$  – średnia granica plastyczności, 1,5 – współczynnik bezpieczeństwa,  $R_{z/200 000/t}$  – czasowa wytrzymałość,  $0,8 \times R_{z/200 000/t} + 5$  – dolna granica wytrzymałości czasowej

ploatacji będzie stopniowo malał do jedności. Całkowite odkształcenie ( $\epsilon$ ) elementu w tym czasie może nadal być mniejsze niż 1%.

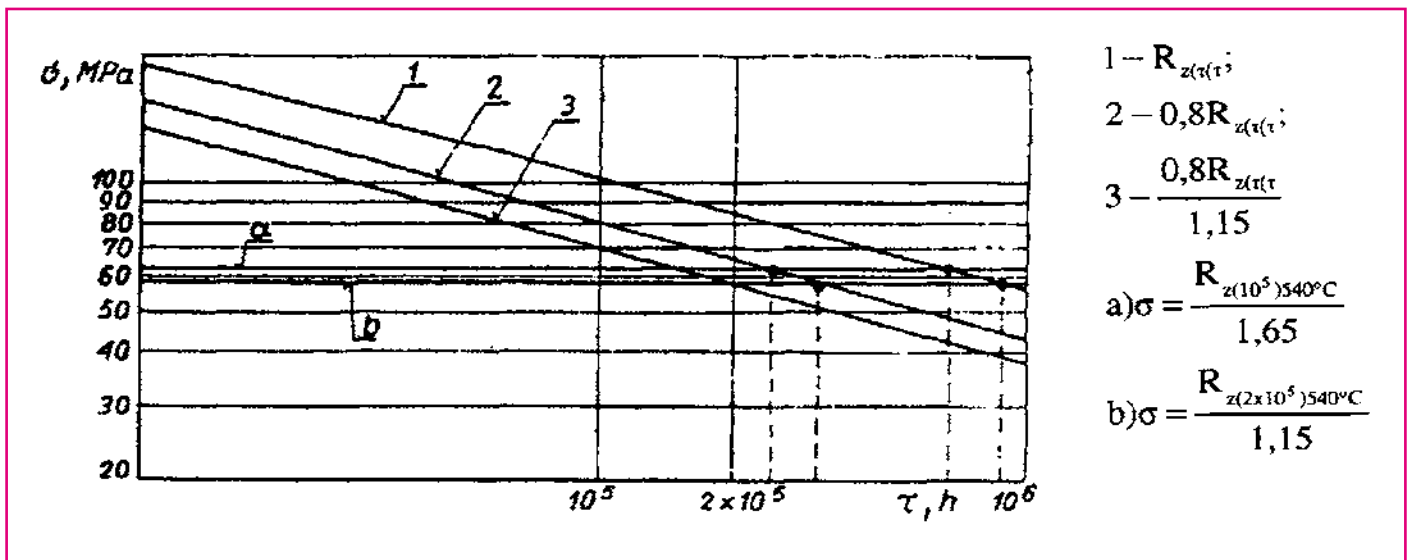
Rozpatrując znaczenie, wytrzymałościowego współczynnika bezpieczeństwa  $x_\sigma$ , można stwierdzić, że w dotychczasowej metodzie obliczeniowej zakładano uszkodzenie elementu po 100 tys. h pracy w przypadku, kiedy naprężenie w ściance nie będzie równe obliczeniowemu, lecz podczas całego okresu eksploatacji będzie od niego większe 1,65 razy. Jest to możliwe jedynie przy występowaniu defektów w ściance elementu. Należy również zaznaczyć, że przed upływem 100 000 h pracy wytrzymałościowy współczynnik bezpieczeństwa jest większy, od 1,65 – zatem pojęcie wytrzymałościowego współczynnika bezpieczeństwa przy obliczeniach opartych na wytrzymałości czasowej ( $R_z$ ) istotnie różni się od pojęcia tego współczynnika określonego dla granicy plastyczności ( $R_{ct}$ ).

Dla dopuszczalnych temperatur pracy stali, stosowanych w kraju do budowy elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania, przy wytrzymałościowym współczynniku bezpieczeństwa  $x_\sigma = 1,65$  – czasowy współczynnik bezpieczeństwa  $x_t > 4$  (rys. 7).

Gdy, do obliczeń, wykorzystana się nie średnią gwarantowaną wytrzymałości czasowej (rozrzut 20%), lecz jej minimalną wartość ( $0,8 R_{z(10^5 t_0)}$ ), to wtedy, wytrzymałościowy współczynnik bezpieczeństwa



Rys. 7. Zależność czasowego współczynnika bezpieczeństwa  $x_t$  od wytrzymałościowego współczynnika bezpieczeństwa  $x_\sigma$  dla różnych gatunków stali [4]



Rys. 8. Trwałość rurociągów obliczona wg EN różnymi metodami (skala podwójnie logarytmiczna) [2]

tych stali będzie  $x_\sigma = 1,65 \times 0,8 = 1,32$ , a czasowy współczynnik bezpieczeństwa  $x_t$  jest ciągle jeszcze większy od 2 (rys. 8).

Oznacza to, że odcinki proste rurociągów liczone wg uprzednio obowiązujących przepisów mogą, niezawodnie, pracować nawet, ponad 250.000 h. Znajduje to, również, potwierdzenie w obliczeniach wykonanych wg PN- 79/M-34033, tj., gdy przyjmuje się:

$$K_{III} = \frac{R_{z(\min(2 \times 10^5) t_0)}}{1,15} \quad (3)$$

**Uwaga:**

Dotyczy to oczywiście prostych odcinków rurociągów – natomiast pozostałe elementy, takie jak: kolana, kształtki, spoiny przy kolanach i kształtkach charakteryzują się czasem pracy (trwałością) krótszym, gdyż zależy on od rzeczywistych naprężeń działających w tych elementach. Naprężenia te są znacznie wyższe od panujących w odcinkach prostych, co może być powodowane działaniem naprężeń dodatkowych (niewłaściwe reakcje zamocowań, niewłaściwe spadki, histereza zamocowań, owalizacja) oraz ich koncentracja.

Elementy grubościennie przeliczone wg (3) uzyskują teoretyczne czasy pracy większe od 200 tys. h. Różnice naprężeń wynikające z dotychczasowego sposobu obliczania i zalecanego przez wymienioną normę są niewielkie, toteż można je pominąć (rys. 8) w obu przypadkach trwałość przeliczono na 250 000 h wg PN-EN/12952-4.

**4. Czas pracy elementów (trwałość obliczeniowa)**

Pojęcie trwałości ściśle wiąże się z dopuszczalnym czasem pracy, i w zasadzie, odnosi się wyłącznie do elementów pracujących w warunkach pełzania. Teoretycznie elementy liczone wg  $R_{et}$  mają nieograniczony czas pracy, praktycznie ich trwałość zależy od rodzaju procesów powodujących ubytek grubości ścianki (korozja, erozja) a szczególnie ich prędkości rozprzestrzeniania się, których wartości są w rzeczywistości niepoliczalne. Stąd konieczność prowadzenia okresowych badań i pomiarów diagnostycznych. Istnieje kilka pojęć dopuszczalnego czasu pracy elementów pracujących powyżej temperatury granicznej np.:

- ◆ projektowy czas pracy – 1
  - ▲ na 100 000 h związany z naprężeniowym współczynnikiem bezpieczeństwa  $x_\sigma = 1,65$  co, jak wiadomo, w przeliczeniu na czasowy współczynnik bezpieczeństwa  $x_t$  daje znacznie wielokrotnie dłuższe wartości ( $\tau_0$ ),
- ◆ nominalny (konstrukcyjny) czas pracy:
  - ▲ dla parametrów pracy i geometrii koncesyjnych charakterystycznych dla wszystkich urządzeń jednego typu ( $\tau_c$ ) wg PN-EN,
- ◆ indywidualny:

- ▲ dla parametrów pracy i geometrii rzeczywistych, indywidualny dla poszczególnych urządzeń ( $\tau_i$ )

- ◆ czas specjalnego nadzoru ( $\tau_s$ )

$$\tau_s = 0,6\tau_i$$

gdzie:

$$\tau_i = \tau_c - \tau_p$$

$\tau_i$  – teoretyczny pozostały czas eksploatacji

$\tau_c$  – czas indywidualny

$\tau_p$  – przepracowana liczba godzin

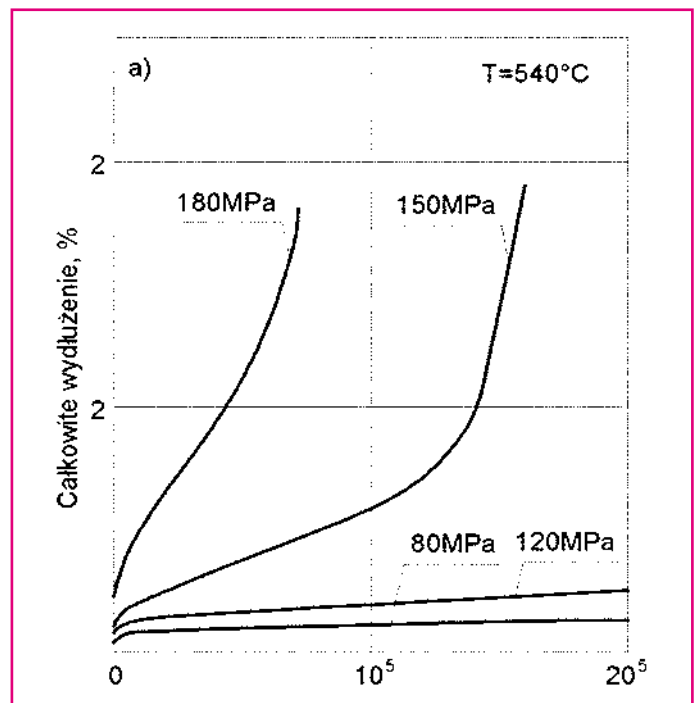
$\tau_s$  – czas specjalnego nadzoru

- ◆ dopuszczalne naprężenia dla rzeczywistej temperatury i wymaganego czasu pracy:

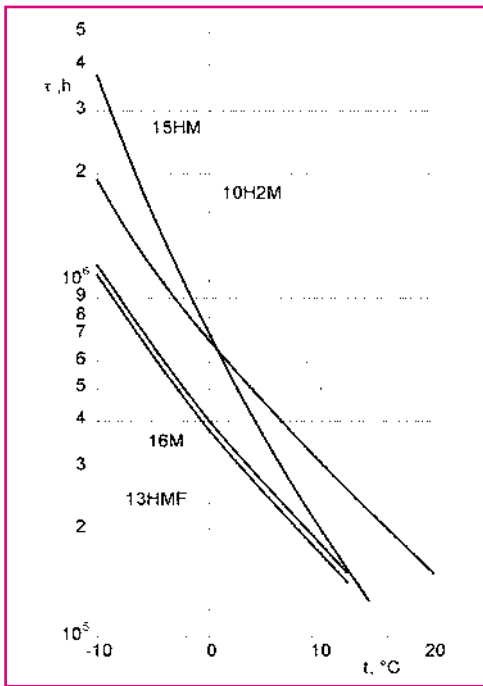
$$\frac{\sigma_{dop}}{\sigma_{rz}} > 1,2$$

gdzie:

$$\sigma_{dop} = 0,8R_{ztt}$$



Rys. 9. Zależność odkształcenia stali od naprężenia [5] stal 10H2 M



**Rys. 10. Wpływ zmian temperatury pracy na trwałość elementu z różnych gatunków stali [5]**  
 16 M temp. oblicz. t = 500°C  
 15HM temp. oblicz. t = 520°C punkt „0” na wykresie  
 13HMF temp. oblicz. t = 540°C  
 10H2 M temp. oblicz. t = 560°C

$\sigma_{rz}$  – naprężenie rzeczywiste (rzeczywiste wymiary, naprężenia od ciśnienia ciężaru własnego i samokompensacji)  
 $\tau$  – zakładany czas pracy 250 000÷300 000 h  
 $t$  – średnia temperatura pracy obliczona z grubości warstwy  
 ♦ dopuszczalny stopień wyczerpania

$$\omega = \frac{\tau_p}{\tau_i} < 0,8$$

### 5. Odształcenia średnicy

Z upływem lat elementy pracujące w warunkach pełzania ulegają odkształceniu. Kształt krzywej odkształcenia zależy od temperatury i naprężenia – rys. 9.

Z doświadczenia wynika, że elementy, nawet po wieloletniej eksploatacji, pracujące w warunkach zgodnych z obliczeniami koncesyjnymi ulegają nieznacznym odkształceniom. Kryterium odkształceniowe oceny przydatności do dalszej eksploatacji są:

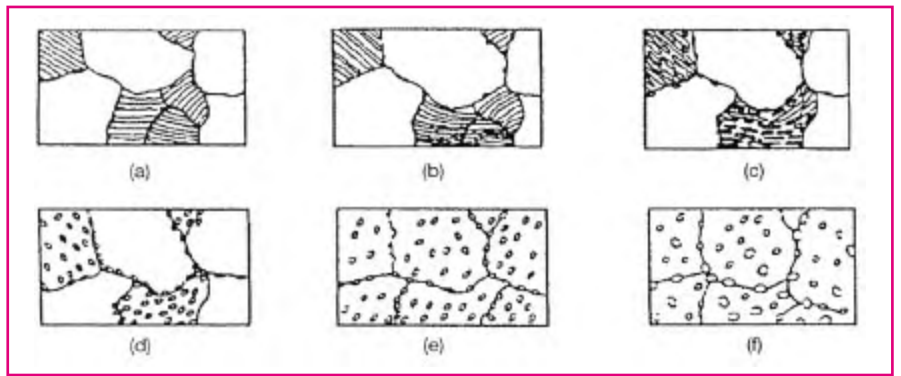
- prędkość odkształcenia  $v < 0,10\%/10\ 000\ h$
- maksymalne dopuszczalne odkształcenie  $\epsilon_{max} < 2\%$

#### Uwagi:

- Istotny wpływ na trwałość wywiera stała temperatura pracy metalu. Przykładowo element wykonany jest ze stali 15HM jest przeznaczony do pracy w temperaturze  $t = 510^\circ C$ , to, jeżeli ta temperatura w sposób ciągły zostanie przekraczana o  $\Delta t = 5^\circ C$ , trwałość elementu zostanie skrócona o 30% (rys. 10).
- Dobre wyniki dają pomiary odkształcenia otworów w dwóch osiach tak, aby jeden pomiar był prostopadły do osi wzdłużnej elementu a drugi równoległy. Odkształcenie oblicza się wg wzoru jak na owalizację.

### 6. Trwałość wg struktury

Wykonuje się najczęściej metodą replik na powierzchni zewnętrznej elementu gdzie w czasie pracy metalu, w podwyższonej temperaturze,



**Rys. 11. Zmiany w strukturze ferrytu lub bainitu [5]: a) stan wyjściowy, b) wydzielenia węglików na granicach ziarna, c) sferoidyzacja węglików, d) rozrost węglików, e) koniec sferoidyzacji, f) rozproszenie węglików**

zachodzą procesy obniżające wytrzymałość czasową. Zmiany te polegają na rozkładzie perlitu lub bainitu wskutek sferoidyzacji cementytu (rys. 11) i wydzielenia węglików pierwiastków stopowych.

Istnieją metody klasyfikacji stopnia wyczerpania powiązanego ze zmianami struktury oraz destrukcją fizyczną metalu – rys. 12.

Zilustrowanie tych związków mikrostruktur ze zmianami i przyporządkowanie im określonych stadiów oraz stopnia wyczerpania ma znaczenie praktyczne – rys. 13.

Fizyczna destrukcja metalu, w postaci pustek pełzaniowych, zapoczątkowuje się na granicach ziaren zorientowanych względem osi naprężenia rozciągającego pod kątem 90°.

Kolejny etap pęknięcia polega na wzroście pustek, w wyniku działania mechanizmu odkształceniowego, które łącząc się ulegają wydłużeniu doprowadzając do powstawania pęknięć na granicach ziarna – rys. 14.

WSKAŹNIK USZKODZENIA			Klasa uszkodzenia	t / T <sub>p</sub>
Fizyczna degradacja	Zmiany strukturalne	Wydzielenia		
1 <sub>D</sub>	1 <sub>M</sub>	1 <sub>P</sub>	A	10
	2 <sub>M</sub>		B	20
2 <sub>D</sub>	3 <sub>M</sub>	2 <sub>P</sub>	C	30
			D	40
3 <sub>D</sub>	4 <sub>M</sub>	3 <sub>P</sub>	E	50
4 <sub>D</sub>			F	60
5 <sub>D</sub>			G	70
			H	80
				90
				100

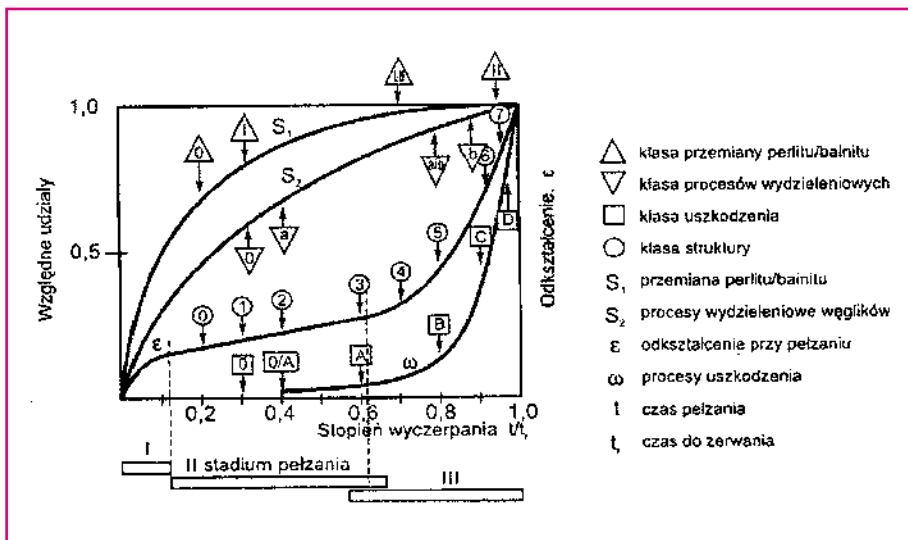
**Rys. 12. Klasyfikacja mikrostruktury [7]**

**Fizyczna degradacja:** 1<sub>D</sub> – bez zmian; jak w materiale rodzimym, 2<sub>D</sub> – pojedyncze pory, 3<sub>D</sub> – pory zorientowane, 4<sub>D</sub> – mikropęknięcia, 5<sub>D</sub> – makropęknięcia

**Zmiany strukturalne:** 1<sub>M</sub> – bez zmian; jak w materiale rodzimym, 2<sub>M</sub> – wydzielenia węglików w ziarnach bainitu, 3<sub>M</sub> – rozkład bainitu, zmiana dyspersji węglików

**Wydzielenia:** 1<sub>P</sub> – bez zmian; jak w materiale rodzimym, 2<sub>P</sub> – koagulacja; rozrost węglików w bainicie, węgliki na granicach ziaren, 3<sub>P</sub> – rozkład i sferoidyzacja węglików,

t – maksymalny czas pracy, t – rzeczywisty czas pracy



Rys. 13. Schemat kształtowania się zmian struktury, uszkodzeń wewnętrznych i stopnia wyczerpania stali po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania [8]

W miejscu wykonania replik wskazanym jest pomierzyć twardość metalu, której wartość powinna zmieścić się w granicach zalecanych przez normę dla danego gatunku materiału. Wyniki badań struktury należy ocenić posługując się katalogiem VGB-TW507.

### 7. Badania niszczące

Niektóre wytyczne zalecają sprawdzenie stopnia wyczerpania metalu za pomocą badań niszczących. Badania te w formie wytrzymałości doraźnej ( $R_m$ ,  $R_c$ ) oraz czasowej ( $R_z$  – wytrzymałość na pełzanie metodą parametryczną Larsena Mullera czas trwania próby ca 3000 h) wykonuje się na wycinkach pobranych z odcinków rurociągów  $l_{ca} = 300$  mm.

**Uwaga:** Badania niszczące wykonywane w kraju i zagranicą dały wyniki trwałości zbyt optymistyczne w wielu przypadkach przekraczające dane uzyskane z obliczeń.

### 8. Obliczenia indywidualnego czasu pracy (przykład) [2]

#### a) Obliczanie rzeczywistych naprężeń w elemencie

W oparciu o rzeczywistą grubość ścianki elementu należy obliczyć rzeczywiste naprężenie ścianki elementu, zgodnie ze wzorem:

$$\sigma_r = \frac{p_r [D_z - g_r (2 - z)]}{2g_r z}$$

gdzie:

- $\sigma_r$  – średnie naprężenie zredukowane
- $p_r$  – ciśnienie robocze czynnika
- $D_z$  – średnica zewnętrzna
- $g_r$  – rzeczywista grubość ścianki
- $z$  – minimalny współczynnik osłabienia wg UDT

#### b) Obliczanie czasu pracy $\tau_r$ i $\tau_s$ w oparciu o parametry rzeczywiste (zamiast wyznaczania z krzywej $R_z = f_{\tau}$ [17])

◇ Wyznaczanie wartości  $R_{z \min / \tau / r}$

– należy odczytać z norm w zależności od pochodzenia materiału, średnie wartości wytrzymałości czasowej na 200 000 h, 250 000 h lub 300 000 h w zależności od danych dla temperatury rzeczywistej i obliczyć wartości  $R_{z \min}$

gdzie:

$$R_{z \min} = 0,8 \times R_z / \tau / t_r$$

◇ Wyznaczenie czasu pracy na podstawie obliczeń algebraicznych. – należy obliczyć czas  $\tau_r$  i  $\tau_s$  wg poniższego wzoru:

$$\lg \tau_r = 5 + 0,30103 \frac{\lg \left( \frac{R_{z \min}(\tau_r) / r}{\sigma_r} \right)}{\lg \left( \frac{R_{z \min}(\tau_r) / r}{R_{z \min}(\tau_s) / r} \right)}$$

stąd:

$$\tau_s = 0,6 \tau_r$$

### 9. Ocena stanu elementu i częstotliwość badań nieniszczących

W zależności od otrzymanych wyników czasu pracy  $\tau_s$  i grubości ścianki  $g_{2r}$  obliczonej przy pracy elementu do 200 000 lub 250 000 h mogą wystąpić trzy przypadki:

◀ przypadek 1 – gdy rzeczywisty czas pracy  $\tau_p$  jest mniejszy od czasu  $\tau_s$ , czyli czasu pracy obliczonego wg parametrów rzeczywistych, po przekroczeniu, którego należy rozpocząć specjalny nadzór ocenianego elementu, tj.

$$\tau_p < \tau_s \text{ i } g_{r2} \leq g_r$$

⇒ badania profilaktyczne np. co 60 tys. h.

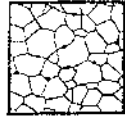
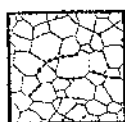
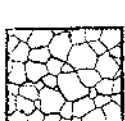
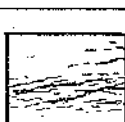
◀ przypadek 2 – gdy czas pracy  $\tau_s$  zostanie przekroczony w stosunku do czasu  $\tau_s$ , tj.

$$\tau_p > \tau_s \text{ i } g_{r2} > g_r \text{ lub } g_{r2} \leq g_r$$

⇒ częstotliwość badań należy zwiększyć i wykonywać je co 30 tys. h.

◀ przypadek 3 – gdy rzeczywisty czas  $\tau_p$  osiąga czas  $\tau_s$

$$\tau_p = \tau_s \text{ i } g_{r2} > g_r$$

Klasa struktury	Cechy charakterystyczne
0	Brak zmian struktury uwarunkowanych procesami pełzania
1	Struktura elementów konstrukcyjnych obciążonych pełzaniowo bez zmian nieodwracalnych
2	 Struktura po w/w obciążeniu z pojedynczymi mikroporami (3 ÷ 5 lat dalszej eksploatacji)
3	 Struktura z oznakami rozpoczynającego się uszkodzenia w postaci łańcuszków mikroporów (obserwacja 1 ÷ 1,5 roku eksploatacji)
4	 Struktura o zaawansowanych uszkodzeniach pełzaniowych, początki mikropeknięć (w przypadkach uzasadnionych - krótkotrwała „kontrolowana” eksploatacja)
5	 Końcowe uszkodzenia struktury - mikropeknięcia. Pęknięcia można udokumentować badaniami magnetycznymi. Wyrób (armatura) do natychmiastowego usunięcia.

Rys. 14. Stopień degradacji fizycznych podzielonych na klasy [1]. Klasa A – pojedyncze pustki, Klasa B – pustki zorientowane, Klasa C – mikropeknięcia, Klasa D – makropeknięcia

⇒ należy natychmiast przeprowadzić badania diagnostyczne określające stan techniczny elementu

Terminy badań profilaktycznych wyznacza się od daty przeprowadzenia pierwszego badania niezależnie od rzeczywistego czasu pracy elementów.

**Uwaga:** Do obliczeń bierze się rzeczywiste dane tj.:

- ★ pomierzone średnice,
- ★ pomierzone grubości,
- ★ zarejestrowane temperatury ścianki lub przeliczone z grubości warstwy tlenków na powierzchni wewnętrznej.

W przypadku rurociągów największy negatywny wpływ na niezawodność mają kolana. Na trwałość kolana, wpływają następujące czynniki:

- ★ metalurgiczne: zmiany własności mechanicznych wskutek niewłaściwej obróbki cieplnej,
- ★ technologiczne: zmiany geometrii przekroju zmniejszenia grubości ścianki w strefie rozciągania.

Ścienienie ścianki i owalizacja przekroju powodują wzrost naprężeń obwodowych. Naprężenia te należy liczyć wg następującego wzoru:

$$\sigma_g = \frac{2p_r}{m(\beta^{2/n} - 1)} \left( 1 + c \frac{\alpha}{100} \right)$$

gdzie:

$p_r$  – ciśnienie robocze

$\beta$  – stosunek średnic (zewn. do wewn.)

$\alpha$  – owalizacja kolana

$m$  – współczynnik pełzania

$c$  – współczynnik zależny od  $\sigma$  i  $m$

w ten sposób obliczone naprężenia panujące w kolanie należy wstawić do wzoru na obliczenie trwałości.

## 10. Podsumowanie

Obecnie znaczna część elementów grubościennych kotłów i rurociągów przekroczyła projektowy czas pracy (100 000 h) a, niektóre z nich przekroczyły, nawet 200 000 h i dalekie są jeszcze od wyczerpania trwałości (trwałość indywidualna) np. rurociągi krajowe budowane w latach 1960÷1980 pracujące w temperaturze nadgranicznej liczone były (grubość ścianki odcinków prostych) w oparciu o wytrzymałość czasową na 100 000 h i dla temperatur obliczeniowych o 5° wyższych od temperatury czynnika. Naprężenie dopuszczalne  $\sigma_{dop}$  liczone ze współczynnikiem bezpieczeństwa  $x_{\sigma} = 1,65$ .

Dane obliczeniowe i eksploatacyjne wskazują, że tak dobrane grubości ścianek elementów są znacznie zawyżone, co umożliwi ich dalszą eksploatację po przekroczeniu projektowanego czasu pracy (100 000 h).

Trwałość, w dużym stopniu, zależy od warunków eksploatacji, rozwiązań konstrukcyjnych, technologii i użytkowania, i jest umownym, kompleksowym wskaźnikiem stanowiącym połączenie wielu cech struktury i własności metalu.

Techniczna ocena elementu, zmierzająca do określenia jego indywidualnej trwałości, polega więc na skojarzonej działalności diagnostycznej wyrażonej w trzech zasadniczych etapach:

### RETROSPEKCJA (STAN DOTYCHCZASOWY ocenianego elementu)

- analiza projektu technicznego (porównanie stanu istniejącego z dokumentacją),
- analiza dotychczasowych warunków pracy (informacje nt. nieprawidłowości eksploatacyjnych – gromadzenie danych ruchowych),
- analiza zaistniałych uszkodzeń wraz z określeniem warunków i przyczyn ich powstawania,
- analiza wyników dotychczas wykonanych badań i pomiarów diagnostycznych.

### DIAGNOZA (STAN OBECNY ocenianego elementu)

wskazaniem jest wykonanie pomiarów diagnostycznych oceniających aktualny stan elementu:

- ◆ przeglądy,
- ◆ badania nieniszczące,
- ◆ badania niszczące,
- ◆ obliczenia wytrzymałościowe oparte na rzeczywistych danych (pomiaru i badania) elementu w rzeczywistych warunkach pracy.

**HORYZONT CZASOWY (PROGNOZA)** – określenie przydatności elementu przez:

- ★ wyznaczenie jego dalszego indywidualnego czasu pracy ( $\tau_i$ ),
- ★ wyznaczenie czasu nadzoru diagnostycznego ( $\tau_s$ ) – częstotliwość i zakres kolejnych badań diagnostycznych,
- ★ określenie warunków dalszej eksploatacji,
- ★ podanie wniosku odnośnie ewentualnej wymiany lub zmiany warunków pracy.

Analizując opisane metody oceny stopnia wyczerpania trwałości, w oparciu o dane doświadczalne, można stwierdzić, że:

- ◀ przy działaniu wysokich naprężeń orientacyjną ocenę należy prowadzić wg wartości stosunku naprężenia dopuszczalnego do naprężenia rzeczywistego,
- ◀ przy długotrwałej eksploatacji ocenę należy wykonywać metodą obliczeniową,
- ◀ dla uzyskania dokładnych informacji metodą obliczeniową należy uzupełniać badaniami struktury,
- ◀ badania diagnostyczne nieniszczące (w tym repliki) powinny być wykonywane okresowo w celu uzyskania informacji o stanie obecnym elementów,
- ◀ badania niszczące, związane z naruszeniem całego elementu, mogą być wykonywane jedynie na odcinkach prostych rurociągów, a ich wynik nie wnosi istotnych informacji o zmianach własności podczas eksploatacji, dotyczy to szczególnie własności doraźnych – dla oceny struktury można pobrać próbki walcowe z kolana lub odcinka prostego rurociągu,
- ◀ badania wytrzymałości czasowej – pełzanie,
- ◀ wykonanie badań diagnostycznych polegających na:
  - ★ przeglądach,
  - ★ badaniach nieniszczących i niszczących,
  - ★ obliczenia dopuszczalnego czasu eksploatacji,
  - ★ analiza obecnych warunków eksploatacji,
- ◀ określenie dalszej przydatności elementów:
  - ◆ wyznaczenie pozostałego czasu pracy (trwałość resztkowa),
  - ◆ zalecenia odnośnie prowadzenia sposobu dalszej eksploatacji, zakresów i terminów remontów, wymian i modernizacji.

Wszystkie działania diagnostyczne mające na celu ocenę aktualnego stanu technicznego elementu oraz ich dalszej przydatności są, z punktu widzenia użytkownika, konieczne i nieodzowne. Wynika to, między innymi, z postępującej dekapitalizacji urządzeń w energetyce, zmuszającej Służby Diagnostyczne do oceny stopnia wyeksploatowania elementów ciśnieniowych (w tym elementów pracujących w warunkach pełzania) oraz do podejmowania decyzji, co do dalszych ich losów.

Pamiętać również należy, że trwałość poszczególnych elementów nie jest jednakowa, co jest dla użytkowników trudnym problemem. Użytkownik ma, bowiem do wyboru częściową (nierzadko bardzo skomplikowaną technologicznie) wymianę elementów konstrukcji bądź wymianę całkowitą lub obniżenie temperatury pracy. Ocena stanu polega, więc na kompleksowych czynnościach diagnostycznych popartych obliczeniami wytrzymałościowymi. Tylko takie postępowanie może zapewnić wiarygodność oceny.

## BADANIA NIENISZCZĄCE Stan techniczny

## Charakterystyki metod stosowanych do badań diagnostycznych

Metoda badania	Oznaczenie	Czułość	Wykrywalne wady	Skuteczność metod	
				Mikropeknięcia	Makropeknięcia
Wizualna	VTO	> 1,0 mm	powierzchniowe	nie wykrywa	raczej wykrywa
Endoskop	VTE	> 1,0 mm	powierzchniowe	nie wykrywa	raczej wykrywa
Ultradźwięk	UTT	2-7 mm <sup>2</sup>	wewnętrzne	wykrywa	nie wykrywa
Magnetyczno-proszkowa	MT	0,3 μm	powierzchniowe i podpowierzchniowe h – do 2 mm	nie wykrywa	wykrywa
Prądowiorowa	ET	0,3 μm	powierzchniowe i podpowierzchniowe h – do 15 mm	nie wykrywa	wykrywa
Penetracyjna	PT	0,3 μm	powierzchniowe	nie wykrywa	wykrywa
Metalografia – repliki	REP	1 μm	powierzchniowe	wykrywa	wykrywa
Metalografia – niszczące	MET	<1 μm	powierzchniowe i wewnętrzne	wykrywa	wykrywa

### Postępowanie w zależności od stopnia wyczerpania „w”

Dane	Poziom I ryzyko R < 4	Poziom II 4 < R < 6	Poziom III 6 < R < 7
Historia eksploatacji	zapisy i protokoły elektrowni	zapisy i protokoły elektrowni	zapisy i protokoły elektrowni
Wymiary	nominalne	pomierzone lub nominalne	pomierzone
Stan techniczny	nominalny	wyniki kontroli	wyniki szczegółowej kontroli
Temperatury i ciśnienia	projektowe	eksploatacyjne	pomierzone
Naprężenia	projektowe	proste obliczenia	złożone analizy
Własności materiałowe R <sub>Z</sub>	minimum wg normy	minimum wg normy	własności rzeczywiste
Pobór próbek	nie	nie	tak

### ROZPOZNANIE WIARYGODNOŚCI METOD OCENY TRWAŁOŚCI

#### Metoda obliczeniowa (czas pracy elementu)

PROJEKTOWY	NOMINALNY	INDYWIDUALNY
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Współczynnik bezp. 1,65</li> <li>• Wytrzymałość średnia</li> <li>• Wymiary nominalne</li> <li>• Parametry nominalne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Współczynnik bez. 1,25</li> <li>• Wytrzymałość 0,8Rz250000h</li> <li>• Wymiary nominalne</li> <li>• Parametry nominalne</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Współczynnik bez. 1,25</li> <li>• Wytrzymałość 0,8Rz250000h/300 000 h</li> <li>• Ciśnienie robocze</li> <li>• Grubość ścianki pomierzona</li> <li>• Temperatura średnia mierzona z warstwy tlenków tj. z całego okresu eksploatacji</li> </ul>

#### Metoda strukturalna

##### Rodzaj próbki

Nieniszczące	Niszczące
Stopień wyczerpania trwałości	Stopień wyczerpania trwałości
Średnia temperatura ścianki wg warstwy tlenków zmierzona ultradźwiękiem	Średnia temperatura ścianki wg warstwy tlenków zmierzona mikroskopowo

Dopuszczalny stopień wyczerpania 70%

#### Wiarygodność metody obliczeniowej

- ♦ PROJEKTOWY            20 – 40%
- ♦ NOMINALNY            40 – 60%
- ♦ INDYWIDUALNY        0 – 70%

**Uwaga:** do obliczeń należy dysponować:

- rzeczywistymi pomiarami grubości,
- zmierzonymi wartościami owalizacji (kolana, otwory).

Obliczenia wg parametrów *on line* oraz geometrii nominalnej mają niższą wiarygodność ze względu na:

- brak danych dotyczących rzeczywistych wymiarów,
- brak danych dotyczących warunków pracy przed rozpoczęciem pomiarów.

#### Wiarygodność metody strukturalnej

- ★ Powierzchniowe (REPLIKI)            wiarygodność 40 – 70%
- ★ Struktura na całym przekroju ścianki    wiarygodność 60 – 90%

**Uwaga:** wiarygodność wzrasta w przypadku istnienia udokumentowanej struktury wyjściowej badanego elementu.

### Wnioski

- Dane eksploatacyjne i laboratoryjne wskazują, że obliczane elementy wg R<sub>Z1,65</sub> mogą pracować znacznie dłużej niż zakładany czas τ = 100 000 h.
- Rzeczywista trwałość elementów zależna jest od warunków pracy a szczególnie temperatury ścianki.
- Istnieje szereg metod oceny stopnia wyczerpania trwałości elementów ciśnieniowych, żadna z nich nie daje 100% pewności.
- Najbardziej wiarygodnymi są metody obliczeniowe oparte o rzeczywiste parametry pracy oraz wymiary – sposób zalecany przez normy europejskie (indywidualny czas pracy).
- W celu podniesienia wiarygodności metod obliczeniowych wskazanym jest uzupełniać je badaniami metalograficznymi oraz pomiarami odkształcenia.
- Ostateczną ocenę należy poprzeć badaniami diagnostycznymi, których wyniki mają na celu dokonanie oceny rzeczywistego stanu elementu zależnego nie tylko od degradacji pelzaniowej metalu.

### PIŚMIENNICTWO

- [1] Jerzy Dobosiewicz: Przydatność elementów kotłów po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy. Energetyka nr 8, 1984 r.
- [2] VGB Merkblatt Lebensdauer Verlängerung von Konventionalen Kraftwerksbloken, VGB-M13.
- [3] Instrukcja oceny stanu oraz kwalifikowania do wymiany komór, kolektorów, rurociągów kotłowych i głównych parowych pracujących w warunkach pelzania. MGiE, Warszawa 1986 r.
- [4] Ewa Zbroińska-Szczuchura, Jerzy Dobosiewicz, Andrzej Rauszer: Warunki pracy niektórych elementów kotłów parowych. Energetyka nr 9, 1992 r.
- [5] Ewa Zbroińska-Szczuchura: Niektóre kryteria oceny trwałości elementów ciśnieniowych bloków energetycznych pracujących w warunkach pelzania. Energetyka nr 1, 1997 r.
- [6] Ewa Zbroińska-Szczuchura: Trwałość elementów rurociągów parowych. Energetyka nr 7, 1993 r.
- [7] Yoshitsu Sud, Matoyuschi Tuaka: Development of non-destructive damage detection and life evaluation technology for Lang term used Boiler Pressure Pats. International Konferense LIVE ASSESSMENT, 1998 r.
- [8] J. Dobrzański, A. Hernas, H. Klimas: Materiałoznawcze podstawy przedłużania czasu bezpiecznej eksploatacji elementów krytycznych kotła. Energetyka nr 10, 1997 r.
- [9] VGB Technisch-wissenschaftliche Berichte. VGB-TW-507, Ausgase 1992
- [10] J. Trzeszczyński, S. Stachura: Przydatność badań niszczących dla oceny stanu technicznego rurociągów parowych pracujących w warunkach pelzania. Energetyka nr 3, 1997 r.
- [11] J. Dobosiewicz: Uszkodzenia kolan rurociągów parowych pracujących w warunkach pelzania. Energetyka nr 4, 1991 r.
- [12] M. Szczygielski, E. Pizon: Diagnostyka kolan rurociągów parowych. Energetyka nr 5, 2002 r.
- [13] PD 10-262-98, Tipowajea instrukcja po kontroluj mietała i prodleniju sroka służby osnownych elementow kotlow turbin i turboprowodow tiepłowych elektrostancji.
- [14] ASME Code for Pressure piping B.31, An American national Standard.
- [15] Design of Piping Systems the MW KEILLOGG Company.
- [16] Praca zbiorowa IE- Zakład Materiałoznawstwa – Uzgodniona z UDT System diagnostyki materiałowej podstawowych elementów urządzeń energetycznych.
- [17] EN-PN/12 952-4 norma obliczania stopnia wyczerpania. ■