ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1986
Seria: ENERGETYKA z. 94 Nr kol. 880

Janusz DOBRZAŃSKI
Fryderyk ZEBIK
Piotr MILIŃSKI

Instytut Metalurgii Żelaza w Gliwicach

Jerzy DOBOSIEWICZ

Południowy Okręg Energetyczny w Katowicach

PRÓBA OCENY TRWAŁOŚCI RESZTKOWEJ I PROGNOZOWANIA DALSZEJ BEZPIECZNEJ PRACY NIEKTÓRYCH ELEMENTÓW KOTŁÓW WYSOKOPRĘŻNYCH

Streszczenie. Podano ogólny sposób postępowania przy dokonywaniu oceny materiału po długotrwałej eksploatacji. Trzy metody prognozowania dalszej bezpiecznej pracy urządzeń ciśnieniowych, pracujących przy podwyższonych temperaturach, ponad obliczeniowy okres czasu pracy: -metoda obliczeniowa nieniszcząca, -metoda oparta na wynikach prób pełzania materiałów po eksploatacji/prędkość pełzania oraz okres czasu do zniszczenia przy naprężeniach i temperaturach zbliżonych do eksploatacyjnych/, -metoda oparta na wynikach prób zmęczenia/liczba cykli do zniszczenia przy stałej amplitudzie odkształceń w zależności od czasu i parametrów eksploatacji/. Propozycja sposobu postępowania przy prognozowaniu dalszej bezpiecznej pracy rurociągów i kotłów parowych.

Przedłużenie okresu bezpiecznej pracy urządzeń ciśnieniowych pracujących przy podwyższonych temperaturach, które osiągnęły lub przekroczyły obliczeniowy okres czasu pracy, wynoszący na przykład dla urządzeń energetycznych 100 000 h /ponad 12 lat/, ma bardzo duże znaczenie gospodarcze. W związku z tym od szeregu lat podejmowane są próby oceny stanu wyeksploatowania urządzeń i ustalenia metod prognozowania ich dalszej bezpiecznej pracy do co najmniej 200 000 h /około 25 lat/. W obu przypadkach konieczne jest określenie ogólnego stanu technicznego urządzeń, obejmującego również ocenę stopnia degradacji szeroko pojętych własności materiałów po długotrwałej eksploatacji. Ilościowa ocena zmian własności jest przy tym możliwa, gdy dysponuje się własnościami materiału i wymiarami rzeczywistymi elementów konstrukcji w stanie wyjściowym/przed eksploatacją/. Znajomość wymiarów wyjściowych jest przy tym szczególnie ważna dla tych elementów, które pracują w warunkach pełzania, to znaczy w warunkach, w których

w miarę upływu czasu należy liczyć się z przyrostem odkształceń trwałych.

W sytuacji, gdy znane są własności materiału w stanie wyjściowym oraz, gdy prowadzono systematyczne pomiary odkształceń i okresowe badania własności na wycinkach elementów, ocena stopnia wyeksploatowania materiału po określonym okresie eksploatacji nie przysparza większych trudności. Zagadnienie komplikuje się, gdy brak danych porównawczych. Taki stan występuje najczęściej i wówczas jedyną drogą do ustalenia trwałości resztkowej są długotrwałe próby pełzania, w których wyznacza się resztkową wytrzymałość na pełzanie i prędkość pełzania przy parametrach zbliżonych do parametrów pracy ocenianego elementu.

W przypadku gdy w materiale po długotrwałej eksploatacji nie zaobserwowano nieodwracalnych zmian w strukturze, na przykład występowania mikropęknięć i mikropor, świadczących o zakończeniu II okresu pełzania ustalonego, wówczas za zbliżone do własności stanu wyjściowego można orientacyjnie przyjąć własności uzyskane po regenerującej obróbce cieplnej. Należy jednak liczyć się z tym, że o ile regenerująca obróbka cieplna na ogół poprawia podstawowe własności mechaniczne określane w doraźnych próbach, o tyle nie zawsze poprawia, a nawet może przyczynić się do obniżenia własności przy temperaturach podwyższonych, takich jak: granica plastyczności czy wytrzymałość na pełzanie [1,2,3].

Uzyskane dotychczas wyniki prób pełzania, prowadzonych na próbkach z materiałów po eksploatacji trwającej ponad 80 000 do 270 000 h [3,4,5,6,7], jak i zagraniczne publikacje [8,9,10] świadczą o tym, że pracujące przy stosunkowo niskich naprężeniach elementy kotłów i rurociągów z niskostopowych stali Cr-Mo, posiadają po osiągnięciu obliczeniowego okresu trwałości jeszcze znaczny zapas trwałości. Dane te potwierdzają wnioski wynikające z wieloletnich doświadczeń Zakładów Energetycznych, zdobytych przy znacznie przedłużonej, bo do około 350 000 h eksploatacji kotłów parowych [11].

O ile ocena stanu materiału po eksploatacji opiera się na rutynowych próbach niszczących, o tyle prognozowanie dalszej, bezpiecznej pracy urządzeń ponad obliczeniowy okres czasu, jest już zagadnieniem bardziej złożonym, do rozwiązania którego nie ma powszechnie przyjętej i obowiązującej metody. Najczęściej stosowane są trzy metody:

1-obliczeniowa nieniszcząca, omówiona w publikacji [11] ujęta w formie instrukcji [12]. W metodzie tej, wzorowanej na zaleceniach TRD-508 [13], czas pracy τ_{ep} /żywotność/ i czas specjalnego nadzoru τ_o, wyznacza się z krzywej wytrzymałości na pełzanie, rys.1, dla rzędnej odpowiadającej rzeczywistemu /obliczonemu/ naprężeniu σ_r panującemu w ocenianym elemencie. Przy tym krzywą średniej wytrzymałości na pełzanie wykreśla się w układzie $\log\sigma$-$\log\tau$ czasu do zniszczenia, w oparciu o zawarte w normach średnie wartości $R_{z/10\,000}$, $R_{z/100\,000}$, $R_{z/200\,000}$, a naprężenie rzeczywiste σ_r /robocze/ oblicza się z zależności:

$$\sigma_r = \frac{D_z - g_{rz}}{2 \cdot z \cdot g_{rz}} \cdot P \quad [\mathrm{MPa}]$$

gdzie: P-ciśnienie obliczeniowe, MPa
D_z-średnica zewnętrzna, mm
g_{rz}-rzeczywista zmierzona grubość ścianki, mm
z-obliczeniowy współczynnik wytrzymałościowy w kierunku wzdłużnym elementu walcowego wg DT/O-201/63,

Metoda stosowana jest z powodzeniem, wymaga jednak spełnienia dwóch zasadniczych warunków, a mianowicie:

a/. zawarte w normach przedmiotowych/na wyroby hutnicze/ wartości wytrzymałości na pełzanie $R_{z/100\ 000}$ i $R_{z/200\ 000}$ są wartościami wiarygodnymi, wprawdzie ekstrapolowanymi, ale ekstrapolowanymi z realnych wyników długotrwałych prób pełzania materiału w stanie wyjściowym,

b/. prognozowanie okresu dalszej pracy dotyczy urządzeń o znanym przebiegu ich dotychczasowej pracy, podczas której rejestrowano parametry pracy, liczbę odstawień i uruchomień oraz prowadzono systematyczne pomiary odkształceń.

2-metoda oparta na wynikach prób pełzania prowadzonych na próbkach pobranych z ocenianego elementu, a więc metoda niszcząca [3,4,14]. W próbach tych wyznacza się prędkość pełzania oraz okres czasu do zniszczenia przy naprężeniach i temperaturach zbliżonych do eksploatacyjnych, rys.2,3 i 4. Jest to zatem procedura długotrwała i kosztowna, wymagająca podjęcia prób z pewnym wyprzedzeniem w stosunku do obliczeniowego okresu czasu i pomimo, że umożliwia ustalenie zbliżonej do rzeczywistej trwałości resztkowej, jest ze zrozumiałych względów niechętnie stosowana, zwłaszcza w odniesieniu do elementów, z których trudno pobrać próbki/np. komory zbiorcze, kolektory/. Jednakże w przypadku posiadania krzywych wzorcowych w oparciu o wyniki prób pełzania po długotrwałej eksploatacji/znacznie powyżej 100 000 h/ dla najczęściej stosowanych materiałów kotłowych, można metodą obliczeniową nieniszczącą, określić dopuszczalny czas dalszej bezpiecznej pracy elementów kotłów lub rurociągów. Krzywe wzorcowe niezbędne do określenia okresu czasu dalszej bezpiecznej pracy urządzeń to: - krzywe resztkowej wytrzymałości na pełzanie /rys.2,3/, - krzywe prędkości pełzania materiału po eksploatacji w funkcji naprężenia i temperatury/rys.4/.

Sposób postępowania przy prognozowaniu dalszej bezpiecznej pracy elementów kotłów i rurociągów schematycznie przedstawiono na rys.5. Względy bezpieczeństwa wymagają, aby przy ustalaniu wydłużonego okresu czasu eksploatacji przyjąć najkrótszy okres czasu wynikający z:

- czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału po eksploatacji,
- maksymalnej prędkości pełzania przy parametrach zbliżonych do eksploatacyjnych,
- rezerwy odkształcenia, to znaczy różnicy pomiędzy dopuszczalnym odkształceniem i maksymalnym rzeczywistym odkształceniem ele-

mentów będących przedmiotem oceny.

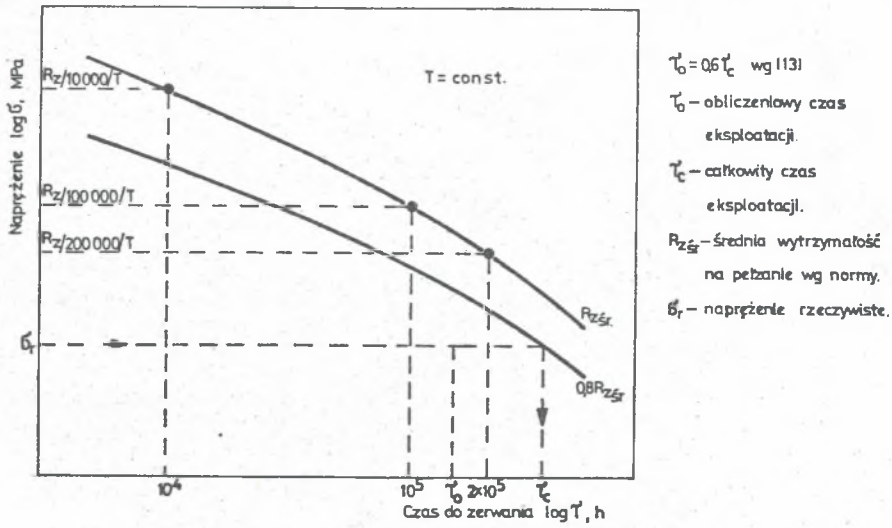
Na podstawie parametrycznej krzywej wytrzymałości na pełzanie $\sigma=f/L/$, przy czym $L=T/C+\log\tau_z/$, gdzie: L-parametr Larson-Millera, T-temperatura, K , τ_z-czas do zerwania, h , C-stała materiałowa, dla znanych wartości naprężeń rzeczywistych w okresie przedłużonej eksploatacji σ_{rp}, wyznacza się parametr L, a następnie znając temperaturę przedłużonej eksploatacji T_{rp}, z podanego powyżej wzoru na parametr L, określa się okres czasu τ_z, po upływie którego należy oczekiwać zniszczenia elementu. Posługując się krzywą maksymalnej prędkości pełzania w zależności od wielkości naprężeń tzn. $\log \dot{\varepsilon}_{ep}=f/\sigma/$, przy stałej temperaturze T_{ep}= const na podstawie wzoru

$$\tau_{ep}=\frac{\varepsilon_{c\ dop}-\varepsilon_e}{\dot{\varepsilon}_{ep}}$$

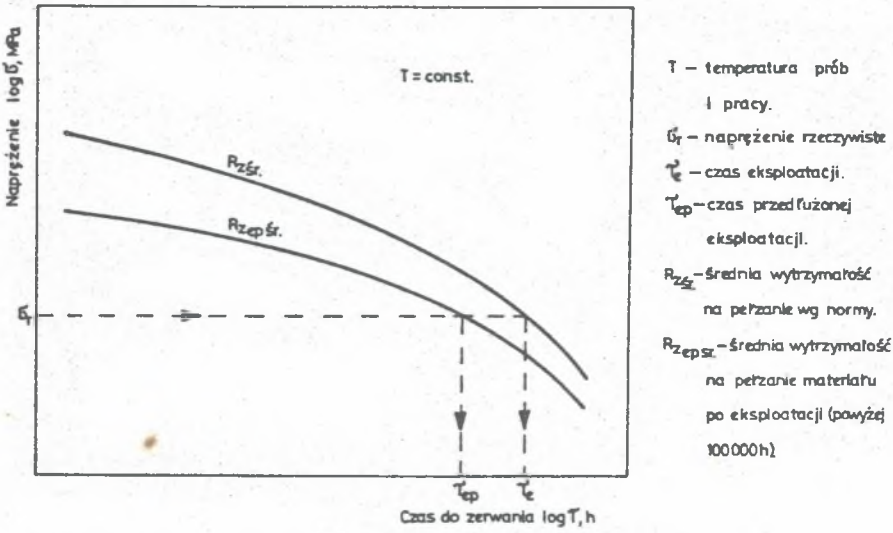
można określić okres czasu przedłużonej bezpiecznej eksploatacji, przy czym $\varepsilon_e \leqslant \varepsilon_{c\ dop}$. Wartość $\varepsilon_{c\ dop}$ przyjmuje się na podstawie doświadczeń eksploatacyjnych rurociągów i kotłów, bloków energetycznych dużej mocy.

3-metoda oparta na wynikach prób pełzania oraz prób zmęczenia, wykorzystująca wyznaczoną wcześniej zależność liczby cykli do zniszczenia przy stałej amplitudzie odkształceń, od okresu i parametrów eksploatacji [15]. Stosowana głównie przy prognozowaniu trwałości turbin.

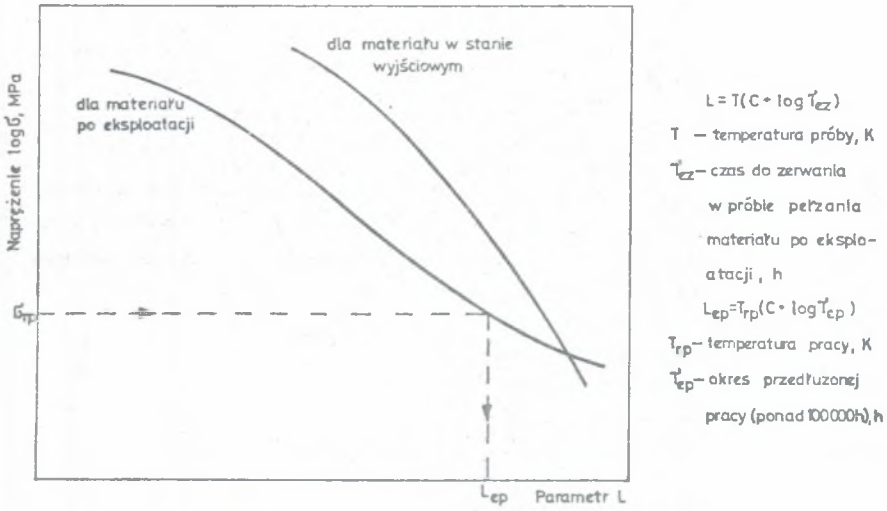
Uzasadnione dążenie użytkowników do stosowania metod nieniszczących, głównie metody obliczeniowej, skłania do rozważenia celowości zastąpienia w tej metodzie wartości 0,8 $R_{z\ śr}$, to znaczy dolnej granicy 20% pasma rozrzutu wyników prób pełzania materiału w stanie wyjściowym/przed eksploatacją/, rys.1, wartościami resztkowej wytrzymałości na pełzanie $R_{z_{epm}}min$, wyznaczonej dla określonego gatunku stali na próbkach pobranych z wycofanych z eksploatacji elementach kotłów i rurociągów, które przepracowały okresy czasu znacznie przekraczające pierwotny okres obliczeniowy 100 000 h. Proponuje się przy tym wykorzystanie parametrycznej krzywej resztkowej wytrzymałości na pełzanie $R_{z_{epm}}$ min, rys.6, umożliwiającej prognozowanie okresu dalszej pracy przy różnych temperaturach pracy. W przypadku przewidywania okresu dalszej pracy w oparciu na kryterium dopuszczalnego odkształcenia, można będzie posłużyć się krzywymi maksymalnej prędkości pełzania $\dot{\varepsilon}_{epm}$ max, rys.4, również wyznaczonymi w próbach pełzania materiałów po długotrwałej eksploatacji. Do sporządzania takich krzywych dla wyrobów z popularnej w energetyce stali 15HM przystąpiono w Instytucie Metalurgii Żelaza [5,6]. Badaniami objęto wyroby, które przepracowały od około 80 000 do około 270 000 h przy temperaturach od 510 do 530°C i naprężeniach roboczych w granicach 45 do 70 MPa. Po zakończeniu badań podjęta będzie próba zmodyfikowania dotychczasowej metody obliczeniowej, przez wprowadzenie do obliczeń wyznaczonych wartości $R_{z_{epm}}min$ i $\dot{\varepsilon}_{epm}$max oraz naprężeń rzeczywistych σ_r, wyznaczonych metodą elementów skończonych.



Rys.1 Obliczeniowy sposób wyznaczania okresu pracy τ_c.
Fig.1 The computational method of τ_c life estimation.

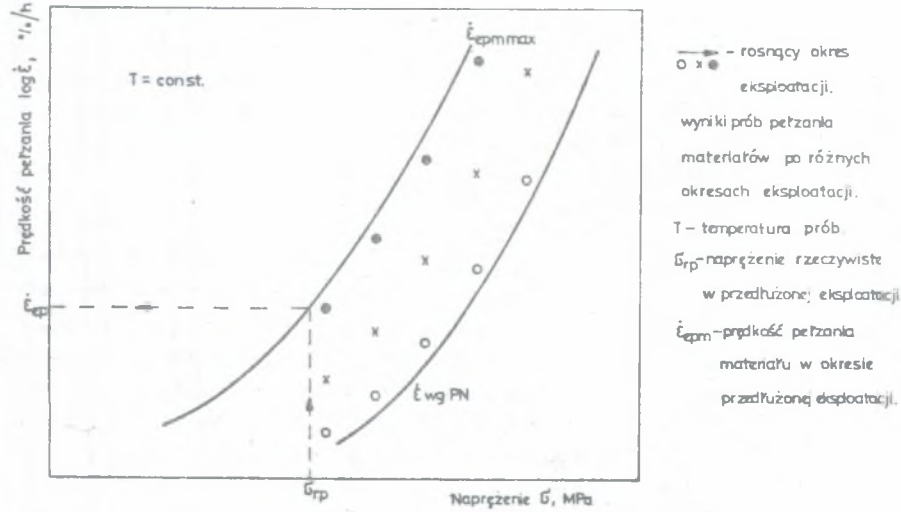


Rys.2 Wytrzymałość na pełzanie materiału w stanie wyjściowym i po długotrwałej eksploatacji.
Fig.2 Stress vs. creep rupture time for basic material and long-term service material



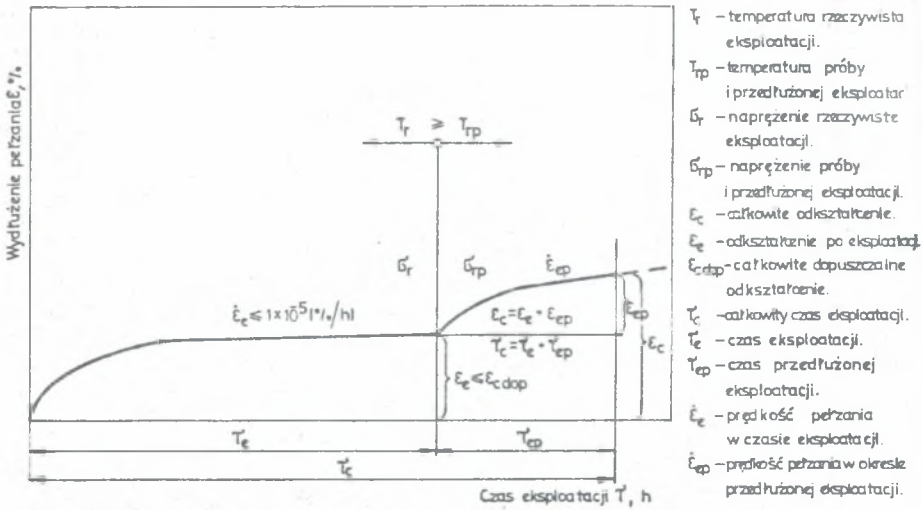
Rys.3 Parametryczna krzywa resztkowej wytrzymałości na pełzanie materiału po ekaploatacji

Fig.3 Larson-Miller parametric master curve of residual creep rupture life of material after long-term service



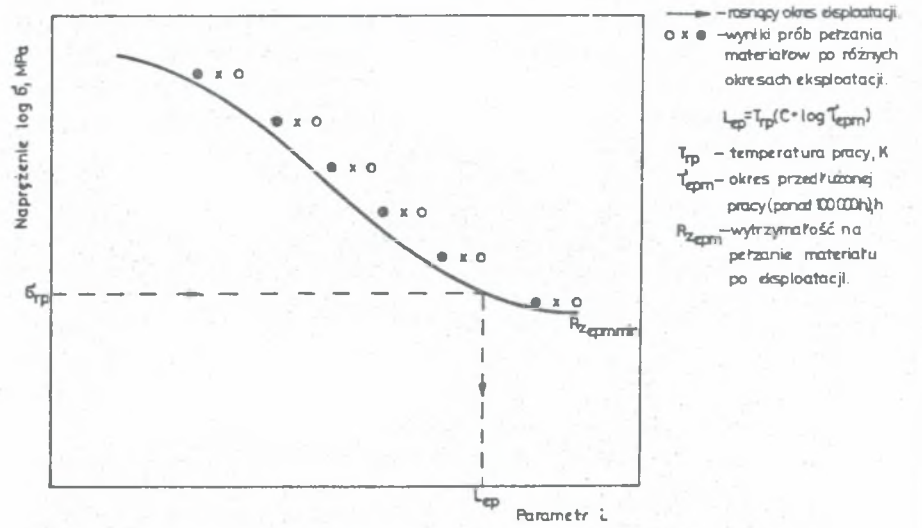
Rys.4 Prędkość pełzania materiału po eksploatacji

Fig.4 Creep rate of material after long-term service.



Rys.5 Ogólny sposób postępowania przy przewidywaniu okresu czasu przedłużonej eksploatacji w oparciu o prędkość pełzania

Fig.5 The general procedure for prediction of residual service life based on the creep rate



Rys.6 Zmodyfikowany sposób obliczeniowy wyznaczania okresu przedłużonej eksploatacji

Fig.6 Modification of computational method of prediction of residual service life

LITERATURA

1. Regener D., Wenk W.: Neue Hütte, t.24, nr 7, 1979.
2. Essam-El-Magd: Arch. Eisenhüttenwesen, t.48, nr 2, 1977.
3. Dobrzański J., Miliński P.: II Seminarium "Stale i stopy do pracy przy podwyższonych i wysokich temperaturach", Wisła 1983, "Ocena trwałości poeksploatacyjnej instalacji ciśnieniowych pracujących przy temperaturach podwyższonych".
4. Dobrzański J.: Badania diagnostyczne rurociągów instalacji reformingu po długotrwałej pracy, Praca IMŻ B-402, w toku.
5. Miliński P., Dobrzański J.: Ustalenie wpływu parametrów długotrwałej eksploatacji przy temperaturach podwyższonych, na strukturę i własności wyrobów z wybranego gatunku stali żarowytrzymałej, Praca IMŻ 02.1-U9-10-00, w toku.
6. Dobrzański J.: Wyznaczenie pozostałej trwałości długoeksploatowanych stali 15HM, 10H2M i 13HMF w oparciu o próby pełzania, Praca IMŻ PR-8/2.6.3-5e3, w toku.
7. Miliński P., Dobrzański J.: Własności mechaniczne stali typu Cr-Mo po długotrwałej eksploatacji, III Konferencja Stale dla energetyki, Zeszyt 27, Opole 1985.
8. Bauman K., Gramberg U.: VGB-Kraftwerkstechnik, t.57, nr 10, 1977.
9. Gramberg U., Günther T.: Arch. Eisenhüttenwesen, t.48, nr 2, 1977.
10. Weber H.: Die Bedeutung verbrauchter Lebensdauer-anteile und von Zeitstandschäden für die weitere Verwendungsfähigkeit betriebsbeanspruchter Bauteile aus warmfesten Stählen, Allianz Versicherungs AG, 1976.
11. Dobosiewicz J.: Trwałość elementów urządzeń energetycznych pracujących w warunkach pełzania, II Seminarium Stale i stopy do pracy przy podwyższonych temperaturach, Wisła 1983.
12. Dobosiewicz J., Krzywda Z., Sanetra P.: Instrukcja ustalania przydatności elementów ciśnieniowych pracujących w warunkach pełzania po przekroczeniu obliczeniowego czasu pracy, ZEOPd Katowice 1985.
13. TRD-508 : Zusätzliche Prüfungen an Bauteilen Anlage 1 - Verfahren zur Berechnung von Bauteilen mit zeitabhängigen Festigkeitskenwerten, 1978.
14. Dobrzański J., Miliński P.: Ocena stopnia degradacji własności wytrzymałościowych materiału po długotrwałej eksploatacji przy temperaturach podwyższonych, Sprawozdanie IMŻ nr 2717/82. Niepublikowane.
15. Etienne C.F., Husslage W.: Arch. Eisenhüttenwesen, t.48, nr 9, 1977.

ПРОБА ОЦЕНКИ РЕСИДУАЛЬНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ДАЛЬНЕЙШЕЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ КОТЛОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Р е з ю м е

Показано общий способ оценки материала после долгосрочной эксплуатации. Три методы прогнозирования дальнейшей безопасной эксплуатации устройств

ботающих под давлением при повышенных температурах сверх расчётного времени эксплуатации:

- расчётный неразрушающий метод,
- метод основан на результатах исследований ползучести материалов после эксплуатации (скорость ползучести и время до разрушения при напряжениях и температурах близких эксплуатационным режимом),
- метод основан на результатах исследовании усталости (число циклов до разрушения при повышенных температурах при постоянной амплитуде деформации в зависимости от времени и параметров эксплуатации).

Предлагаемый способ действия при прогнозировании дальнейшей безопасной эксплуатации устройств, работающих при повышенных температурах.

ATTEMPT OF ESTIMATION OF RESIDUAL LIFE AND PREDICTION
OF FURTHER SERVICE OF SOME ELEMENTS
IN HIGH PRESSURE BOILERS

S u m m a r y

The general procedure for estimation of material after long-term service was given. There are three methods of prediction of further safe service of pressure vessels which work under high-temperature over computational time of service:

- the nondestructive computational method,
- the method based on the creep tests results of materials after service (creep rate and time to rupture with stresses and temperatures close to these of service),
- the method based on the fatigue tests results (number of cycles to failure with the constans strain amplitude according to time and parameters of service).

The proposal of procedure for prediction further safe service of steam pipelines and steam boilers.

Recenzent: Doc. dr hab. inż. Gerard Kosman

Wpłynęło do Redakcji w marcu 1986 r.