

3. Zmiany własności mechanicznych badanych stali po eksploatacji w warunkach pełzania

W wyniku procesów aktywowanych cieplnie wywołanych temperaturą i ciśnieniem w długim czasie następują zmiany w strukturze materiału, których skutkiem jest pogarszanie się zespołu jego własności użytkowych, powodujących obniżanie się zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych. Niezależnie od struktury stanu wyjściowego, następuje obniżanie się własności wytrzymałościowych (R_m , R_e , R_e') przy równoczesnej utracie odkształcalności, której odzwierciedleniem są wartości: wydłużenia w próbie rozciągania oraz pracy łamania w próbie uderności (A , KV). Wyznacznikiem zmniejszających się własności wytrzymałościowych jest ponadto wartość twardości. Jeżeli charakter zachodzących zmian można uznać za stosunkowo łatwy do przewidzenia, to jego wymiar liczbowy odniesiony do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym dla różnych stanów zdegradowanej struktury po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, jest nie do przewidzenia bez stosownych badań. Dynamika zachodzących zmian jest przede wszystkim zależna od typu struktury stanu wyjściowego materiału oraz od rzeczywistych eksploatacyjnych warunków temperaturowo-naprężeniowych. Ponadto, możliwe występujące różnice w strukturze stanu wyjściowego dla danego gatunku stali dodatkowo mogą zwiększać lub zmniejszać skłonność materiału w stanie wyjściowym do rodzaju i szybkości zachodzących zmian w strukturze, w wyniku eksploatacji. Dlatego w sposobie oceny przydatności materiału do dalszej eksploatacji przyjęto, że zależy ona od stopnia degradacji struktury, któremu przypisuje się odpowiadające mu wartości zespołu własności, zakładając że w materiale jest zapisana historia eksploatacji, a uzyskany obraz struktury jest łącznym odzwierciedleniem stanu wyjściowego i jej degradacji w wyniku eksploatacji.

Aby oszacować i wyznaczyć bezpieczny czas eksploatacji materiału elementów urządzeń pracujących w warunkach pełzania, szczególnie po przekroczeniu przyjętego do obliczeń czasu, zwanego obliczeniowym, niezbędna jest znajomość ich resztkowych własności na pełzanie. Ponieważ każda instalacja musi być okresowo odstawiana (odstawienia planowane i nieplanowane), podlegając okresowym naprawom i remontom, to niezbędnym jest wykonywanie sprawdzających wodnych prób ciśnieniowych szczelności instalacji i jej zdolności do przenoszenia obciążeń w temperaturze próby. Dlatego oprócz znajomości resztkowych własności na pełzanie, istotna jest również znajomość podstawowych własności wytrzymałościowych i plastycznych tych materiałów po długotrwałej eksploatacji w różnym czasie.

W dalszej części niniejszej monografii przedstawiono tylko wybrane wyniki badań z najczęściej dotychczas eksploatowanych materiałów w elementach części ciśnieniowej kotłów pracujących w warunkach pełzania i tak: stali 16Mo3 z wężownic i komór przegrzewaczy pary, stali 13CrMo4-5 i 10CrMo9-10 z wężownic i komór przegrzewaczy pary, stali 14MoV6-3 z głównych rurociągów pary oraz stali X20CrMoV11-1 z wężownic i komór przegrzewaczy pary. Celem zaprezentowania charakteru zaobserwowanych zmian będących skutkiem długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania i wartości oznaczanych własności przedstawiono wyniki badań uzyskane na wybranych wycinkach elementów o typowych parametrach pracy i różnym czasie eksploatacji dla każdego z badanych gatunków stali.

Dla każdego z wycinków badanych elementów ze stali niskostopowych wyznaczono rzeczywistą temperaturę eksploatacji w oparciu o znajomość grubości warstwy tlenków po stronie parowo-wodnej i dotychczasowego rzeczywistego czasu pracy. Sposób jej określania omówiono w dalszej części niniejszego rozdziału. Dla badanej stali X20CrMoV11-1 po eksploatacji rzeczywistą temperaturę eksploatacji przyjęto natomiast w oparciu o uzyskane informacje i wyniki pomiarów eksploatacyjnych. Aby porównywać uzyskane wyniki badań dla różnych wartości temperatury eksploatacji, odpowiadających różnym czasom eksploatacji, wprowadzono pojęcie równoważnego czasu eksploatacji t_e^R odpowiadającego przyjętej dla porównywanych materiałów równoważnej temperaturze eksploatacji T_e^R . Sposób jego wyznaczenia przedstawiono w dalszej części niniejszego rozdziału. Równocześnie, uzyskane wyniki badań odniesiono do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym.

Temperaturę eksploatacji badanych stali można wyznaczyć, znając rzeczywistą grubość warstwy tlenków po stronie wewnętrznej badanych rur po długotrwałej eksploatacji. Korozja parowo-wodna materiału elementów przegrzewaczy pary z tych stali ma charakter równomierny. W zależności od czasu i temperatury w elementach z tych stali powstaje odpowiedniej grubości warstwa tlenków żelaza, która jest skutkiem korozji parowo-wodnej. Jej prędkość jest zależna od stałej utleniania K , temperatury eksploatacji T_e oraz czasu eksploatacji t_e . Została ona opisana równaniem [482]:

$$(\Delta g_w)^2 = K \cdot t_e \quad (3)$$

gdzie:

Δg_w – przyrost grubości warstwy tlenków,

K – stała utleniania,

t_e – czas eksploatacji.

Doświadczenie eksploatacyjne i badania laboratoryjne potwierdziły ściśle oddziaływanie temperatury i czasu eksploatacji na przyrost grubości warstwy tlenków po stronie parowo-wodnej Δg_w elementów przegrzewaczy pary. W oparciu o te doświadczenia wyznaczono empiryczną zależność pomiędzy stałą utleniania K a temperaturą eksploatacji T_e dla niskostopowych stali będących przedmiotem badań, która została opisana zależnością [483]:

$$\log K = -\frac{9856}{T_e} + 5,20. \quad (4)$$

Znając grubość warstwy tlenków i czas pracy elementów przegrzewacza pary można wyznaczyć równoważną temperaturę dotychczasowej eksploatacji T_e z równania:

$$T_e = 9856 / [5,20 - \log (g^2 / t_e)] \quad (5)$$

gdzie:

T_e – równoważna temperatura eksploatacji,

g – grubość warstwy tlenków,

t_e – czas eksploatacji,

bądź z nomogramu będącego zależnością grubości warstwy tlenków od strony parowo-wodnej Δg_w od czasu eksploatacji t_e dla różnych wartości temperatury eksploatacji T_e w zakresie od 500 do 600°C.

Czas długotrwałej eksploatacji wyrażony równoważnym czasem eksploatacji t_e^R , wyznaczono z uogólnionej parametrycznej zależności Larsona-Millera [482]:

$$LM = T_e(C + \log t_e) = T_e^R(C + \log t_e^R) \quad (6)$$

gdzie:

LM – parametr Larsona-Millera,

T_e – temperatura eksploatacji w K,

T_e^R – równoważna temperatura eksploatacji w K,

t_e – czas eksploatacji w godzinach,

t_e^R – równoważny czas eksploatacji w godzinach,

C – stała materiałowa.

Czas równoważnej eksploatacji t_e^R materiałów badanych elementów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania wyznaczono dla przyjętej temperatury równoważnej T_e^R .

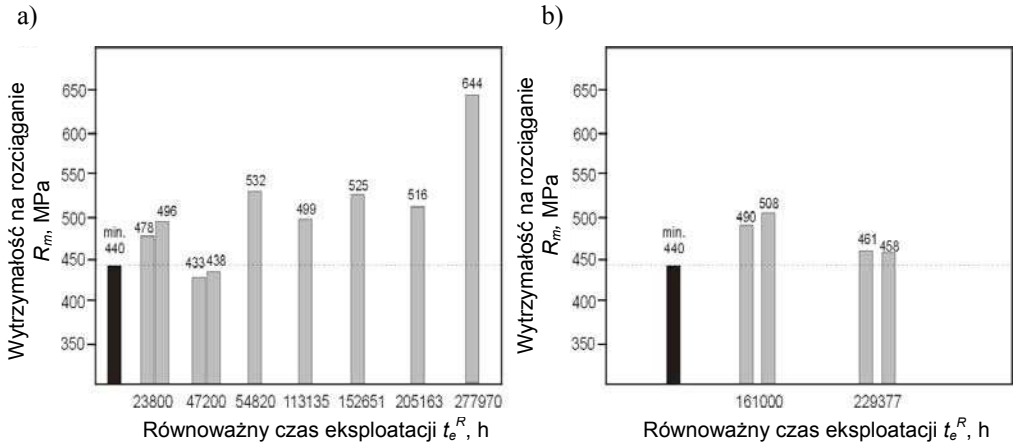
Badania własności mechanicznych, a w tym: wytrzymałości na rozciąganie i granicy plastyczności w temperaturze pokojowej, granicy plastyczności w podwyższonej temperaturze

oraz udarności przy różnych wartościach temperatury badania wykonano, zgodnie z wymaganiami norm dla rur na elementy urządzeń ciśnieniowych do pracy w podwyższonej temperaturze, na próbkach wzdłużnych. Wyniki uzyskane w opracowaniach własnych [101-435] przedstawiono w postaci zależności badanych własności od równoważnego czasu eksploatacji t_e^R dla przyjętej stałej temperatury T_e^R wycinków elementów z jednego gatunku stali pochodzących z jednego rodzaju elementów po eksploatacji w warunkach pełzania. Wyniki te odniesiono do wymagań dla rur z tych stali w stanie wyjściowym.

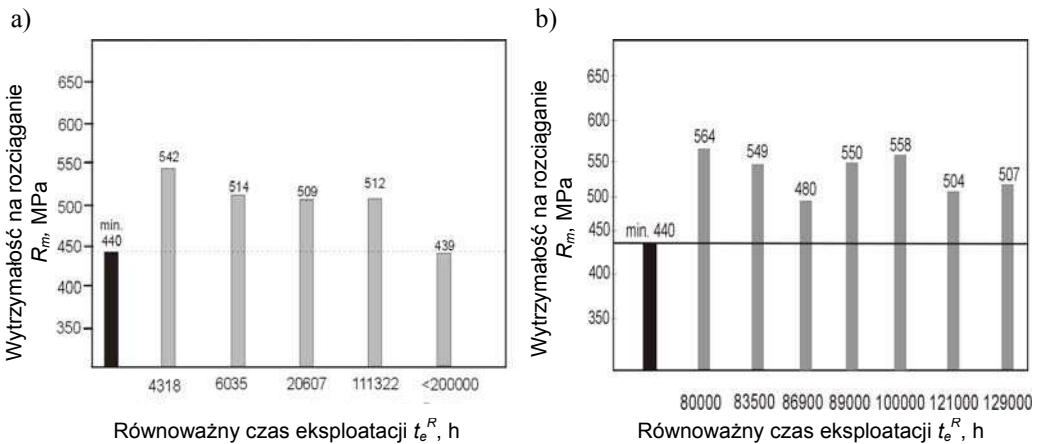
Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej badanych stali przedstawiono na rysunkach 23-27, a materiału wybranych węzownic oraz komór przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotła z niskostopowej stali 16Mo3 przeznaczonej do długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 500°C – na rysunku 23. Wytrzymałość na rozciąganie przez dość długi czas utrzymuje się na poziomie wartości wyższych niż wymagana wartość minimalna dla materiału badanych elementów w stanie wyjściowym. W większości przypadków po okresie eksploatacji zbliżonym do 200 000 godzin lub dłuższym następuje jej wyraźne obniżenie, ale poniżej wartości rzeczywistych stanu wyjściowego badanego materiału elementu. Podobne zmiany obserwuje się dla materiałów węzownic, jak i komór przegrzewaczy pary wykonanych ze stali 13CrMo4-5 przeznaczonej do długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 560°C (rys. 24) gdzie również następuje znaczne obniżenie wytrzymałości na rozciąganie, ale często poniżej minimalnej wartości wymaganej dla stanu wyjściowego. Charakter tych zmian jest jednak zależny od poziomu wytrzymałości na rozciąganie materiału elementu w stanie wyjściowym, jak również od parametrów temperaturowo-naprężeniowych eksploatacji.

Podobne zmiany jak dla stali 13CrMo4-5 zaobserwowano również w materiale węzownic i komór przegrzewaczy pary ze stali X20CrMoV11-1 przeznaczonej do długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 590°C (rys. 27). Obniżanie się wytrzymałości na rozciąganie materiału węzownic wykonanych ze stali 10CrMo9-10 przeznaczonej do długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 580°C zachodzi podobnie, chociaż jej wyraźny spadek obserwuje się po znacznym przekroczeniu 200 000 godzin pracy w warunkach pełzania (rys. 25a). Dla materiałów komór przegrzewaczy z tej stali nie stwierdzono natomiast wytrzymałości na rozciąganie niższej niż wymagana wartość minimalna nawet dla materiałów tych komór po najdłuższym równoważnym czasie eksploatacji (rys. 25b). Podobne wyniki uzyskano dla materiałów elementów

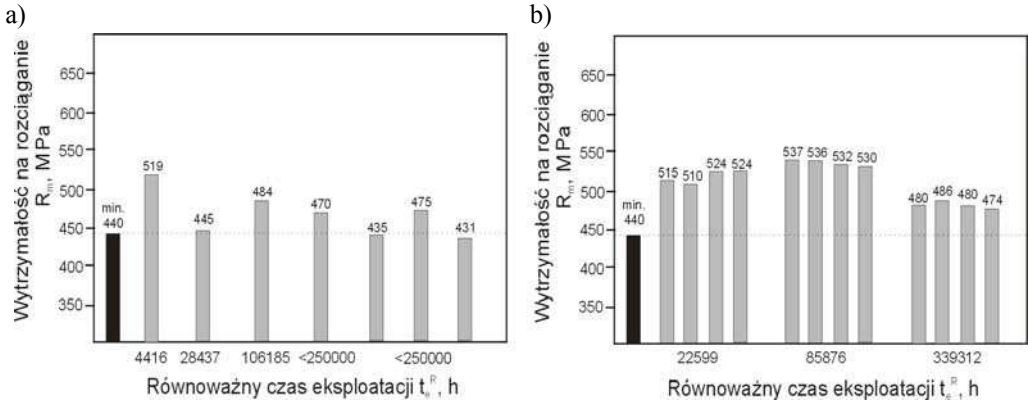
głównych rurociągów parowych wykonanych ze stali 14MoV6-3 przeznaczonej do długotrwałej pracy w temperaturze do ok. 580°C (rys. 26).



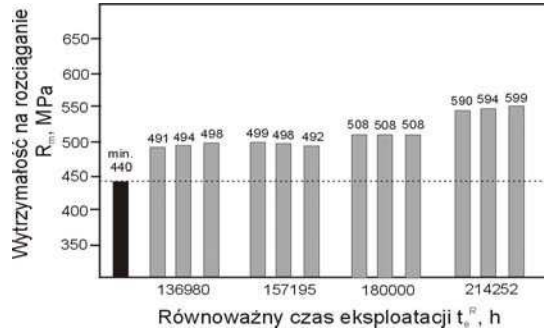
Rysunek 23. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 16Mo3: a) wężownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$



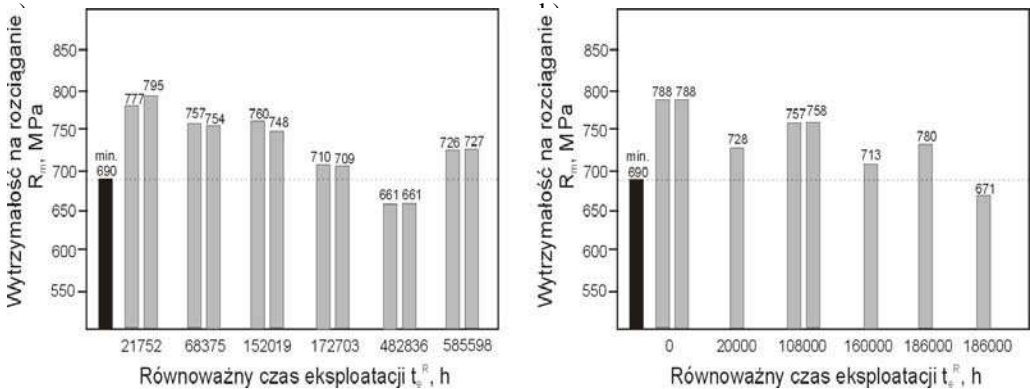
Rysunek 24. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5: a) wężownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$



Rysunek 25. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 10CrMo9-10: a) węzłowiec przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

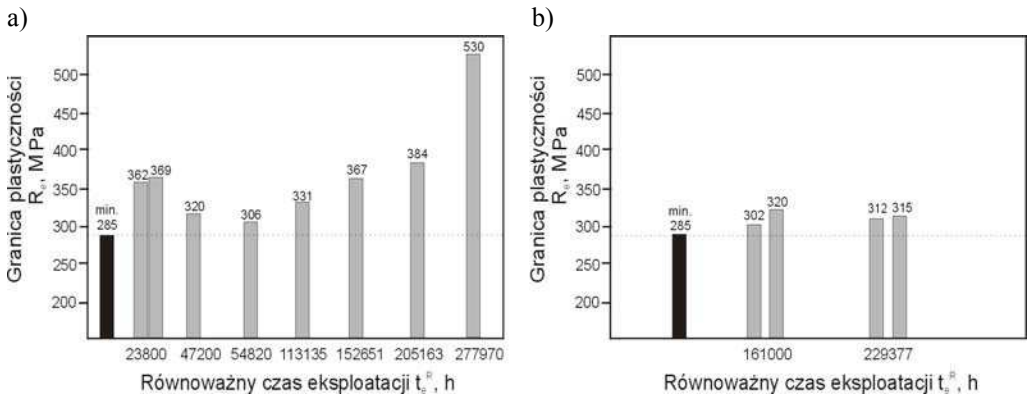


Rysunek 26. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału wycinków głównych rurociągów pary kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

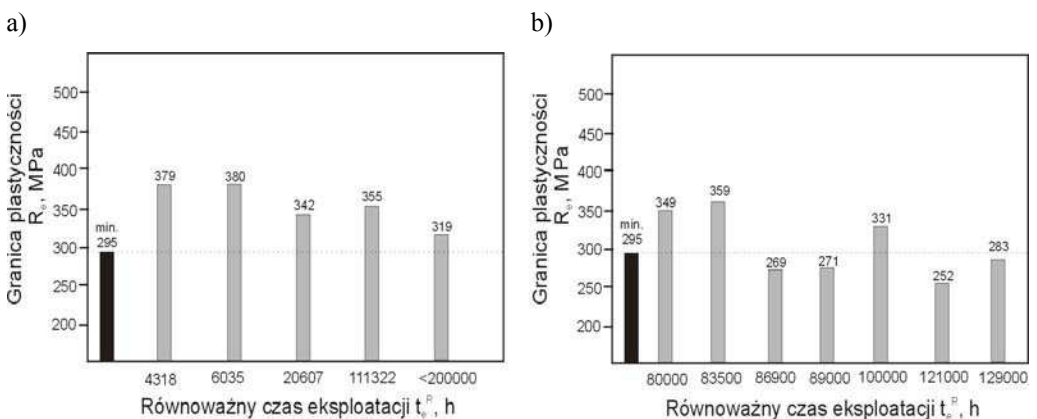


Rysunek 27. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 na wytrzymałość na rozciąganie w temperaturze pokojowej; a) węzłowiec przegrzewacza pary; $T_e^R = 570^\circ\text{C}$, b) komór wylotowych przegrzewacza pary; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

W podobny sposób jak wyniki badań wytrzymałości na rozciąganie przedstawiono uzyskane wyniki badań granicy plastyczności w temperaturze pokojowej (rys. 28-32). Wpływ długotrwałej eksploatacji, wyrażony równoważnym czasem eksploatacji, na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej wycinków elementów kotła ze stali 16Mo3 przedstawiono na rysunku 28. Niezależnie od czasu eksploatacji zarówno dla materiałów węzownic, jak i komór przegrzewacza pary, granica plastyczności jest wyższa od minimalnej wymaganej dla materiału w stanie wyjściowym. Podobne wyniki uzyskano dla materiału węzownic i komór przegrzewacza pary wykonanych ze stali 13CrMo4-5 (rys. 29a).

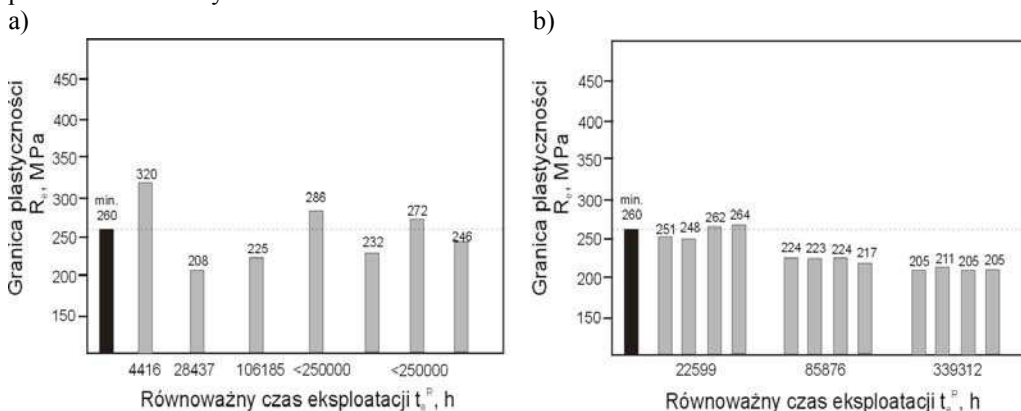


Rysunek 28. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 16Mo3: a) węzownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$

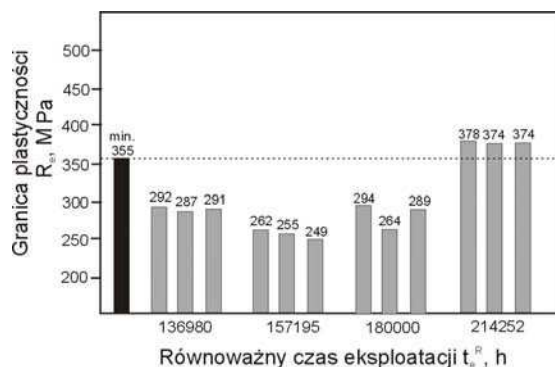


Rysunek 29. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5: a) węzownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$

Wyniki badań granicy plastyczności w temperaturze pokojowej materiałów komór przegrzewacza pary wykonanych ze stali 13CrMo4-5, wężownic i komór przegrzewacza pary ze stali 10CrMo9-10 oraz materiałów głównych rurociągów parowych ze stali 14MoV6-3 wykazują natomiast znaczne zróżnicowanie i większość materiałów po eksploatacji nawet często krótszej niż 100 000 godzin charakteryzuje się wartościami znacznie niższymi niż minimalna wymagana dla stanu wyjściowego tych stali (rys. 29b, 30, 31). Zbadane materiały wężownic i komór przegrzewacza pary ze stali X20CrMoV11-1 charakteryzują się natomiast systematycznym obniżaniem wartości granicy plastyczności, która najczęściej powyżej 150 000 godzin eksploatacji jest niższa od wymaganej dla stanu wyjściowego tej stali, co przedstawiono na rysunku 32.

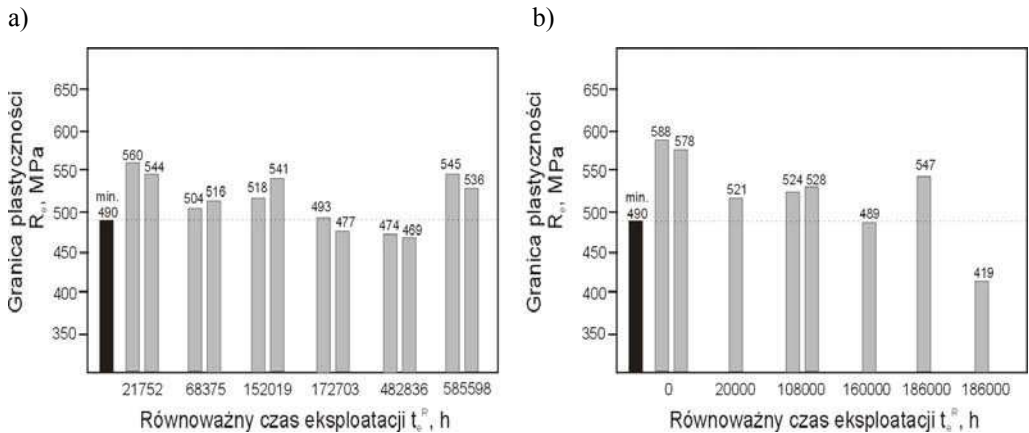


Rysunek 30. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 10CrMo9-10: a) wężownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

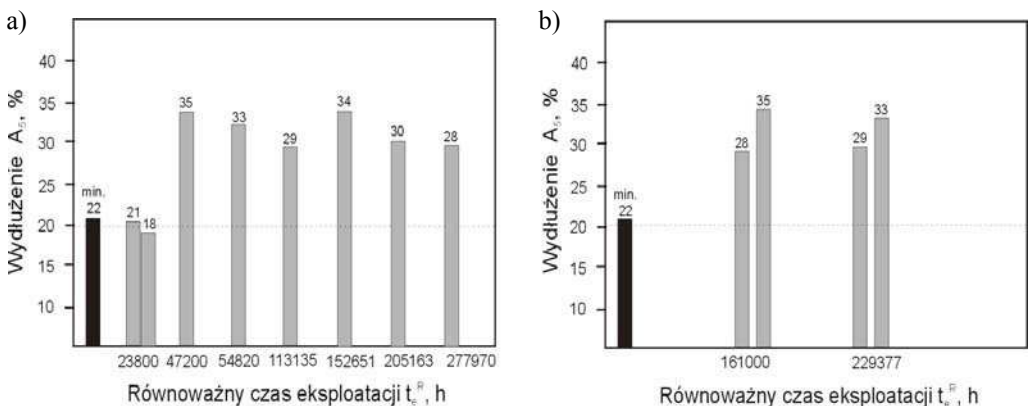


Rysunek 31. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału wycinków głównych rurociągów pary świeższej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

Wpływ długotrwałej eksploatacji na wydłużenie w próbie rozciągania przedstawiono dla materiału badanych elementów wykonanych: ze stali 16Mo3 na rysunku 33, ze stali 13CrMo4-5 na rysunku 34, ze stali 10CrMo9-10 na rysunku 35, ze stali 14MoV6-3 na rysunku 36 oraz ze stali X20CrMoV11-1 na rysunku 37. Dla wszystkich badanych materiałów uzyskane wartości są wyższe, a w pojedynczych przypadkach co najmniej równe wartości wymaganej dla stanu



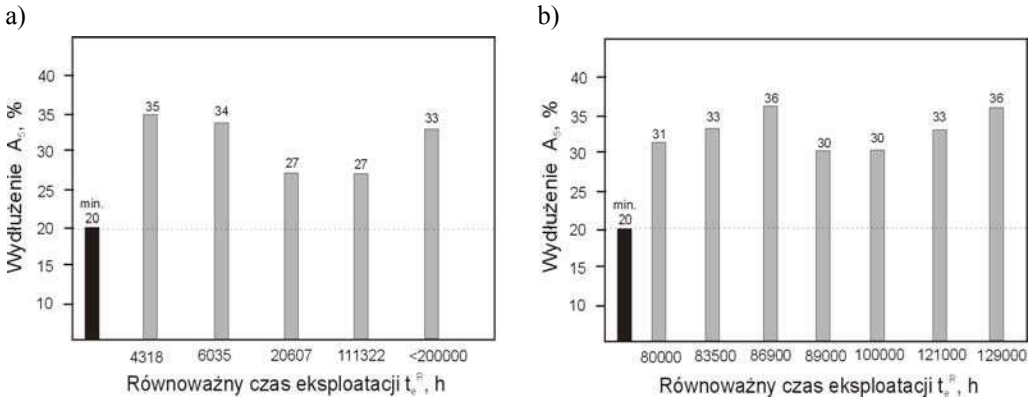
Rysunek 32. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału elementów kotłów energetycznych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 na granicę plastyczności w temperaturze pokojowej: a) węzła przegrzewacza pary; $T_e^R = 570^\circ\text{C}$, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$



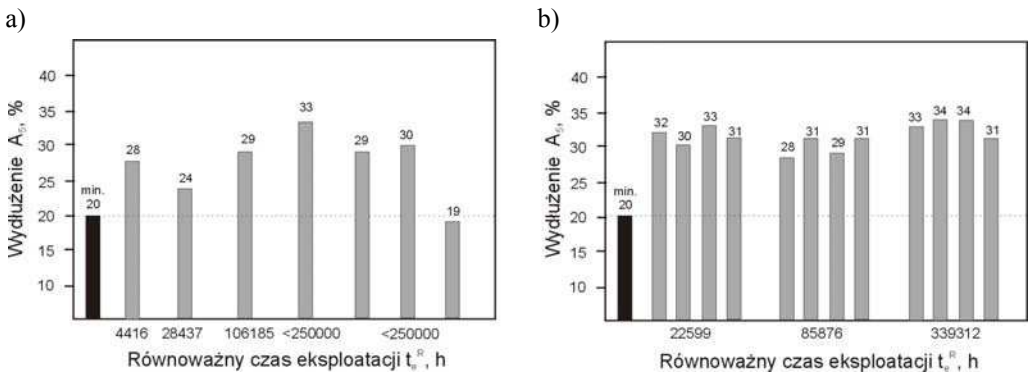
Rysunek 33. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 16Mo3: a) węzła przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$

wyjściowego każdej z badanych stali i to nawet po czasie eksploatacji znacznie przekraczającym 200 000 godzin.

Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania badanych stali na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze przedstawiono w postaci graficznej na rysunkach 38-42. Uzyskane wyniki badań odniesiono do wymagań dla materiału w stanie wyjściowym, a czas długotrwałej eksploatacji wyrażono równoważnym czasem eksploatacji t_e^R . Dla badanej stali 16Mo3 granica plastyczności w temperaturze 490°C oraz dla stali 13CrMo4-5 w temperaturze

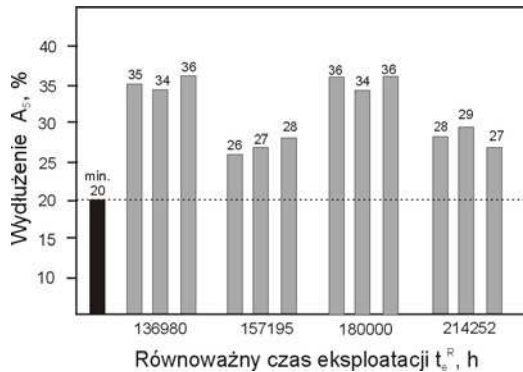


Rysunek 34. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5: a) węzownica przegrzewacza pary, b) komora przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$

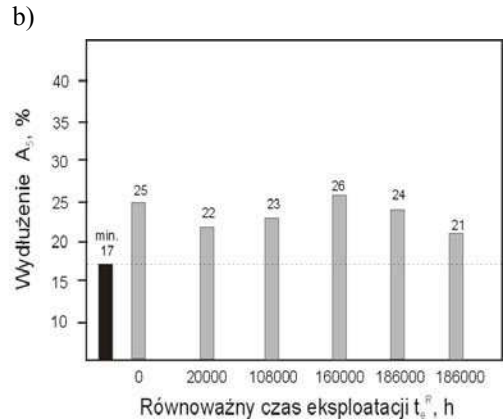
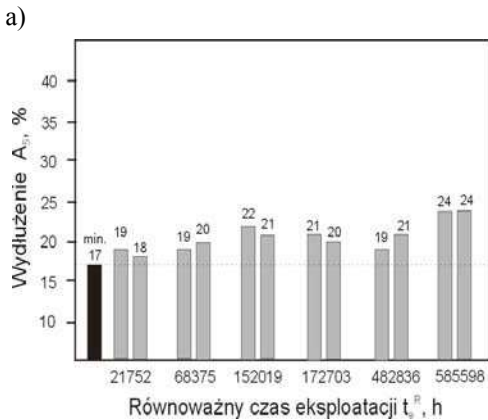


Rysunek 35. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 10CrMo9-10: a) węzownica przegrzewacza pary, b) komora przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

500°C do 100 000 godzin pracy, jest wyższa od minimalnej wartości wymaganej dla stanu wyjściowego. Powyżej 100 000 godzin pracy w warunkach pełzania dla stali 16Mo3 utrzymuje się ona w dalszym ciągu na poziomie powyżej wartości minimalnej wymaganej dla stanu wyjściowego, a dla stali 13CrMo4-5 ulega ona najczęściej obniżeniu poniżej tej wartości i to często znacznie (rys. 38, 39). Dla wielu badanych wycinków elementów ze stali 10CrMo9-10 oraz 14MoV6-3 granica plastyczności w temperaturze 500°C już po kilkudziesięciu tysiącach godzin pracy jest natomiast niższa od wymaganej dla stanu wyjściowego, a powyżej 100 000

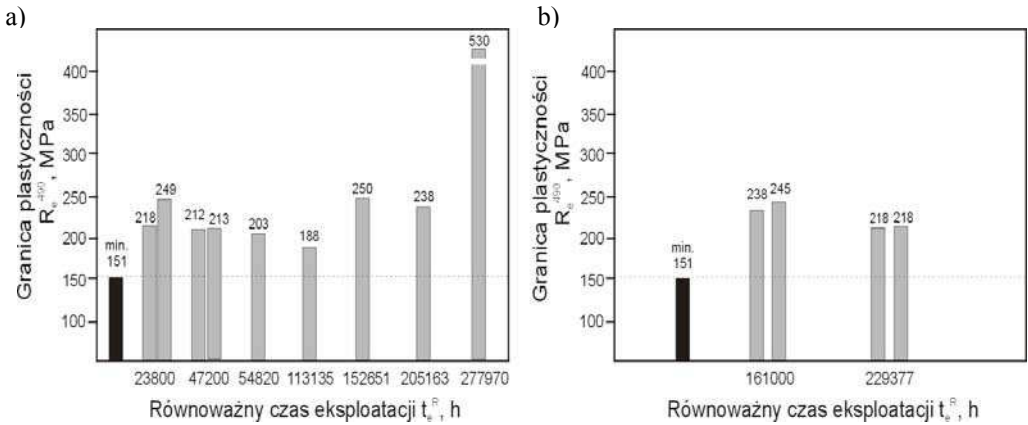


Rysunek 36. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 na wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

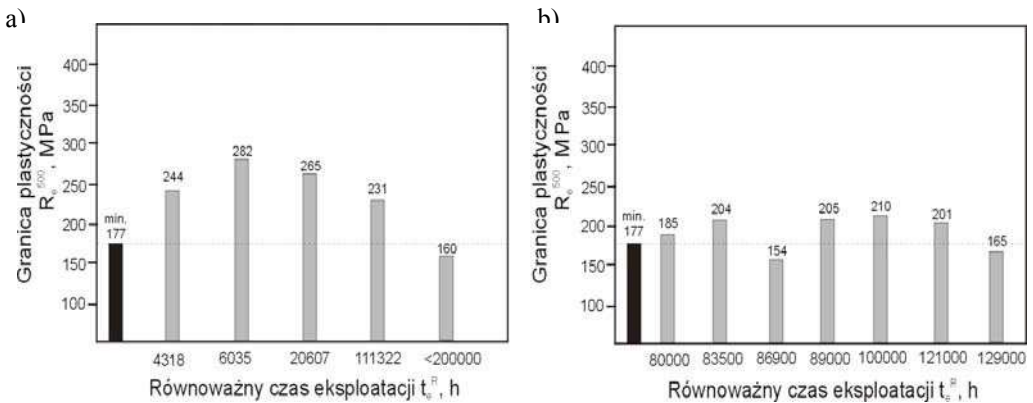


Rysunek 37. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału elementów kotłów energetycznych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 na wydłużenie w próbie rozciągania w temperaturze pokojowej: a) węzownic przegrzewacza pary; $T_e^R = 570^\circ\text{C}$, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

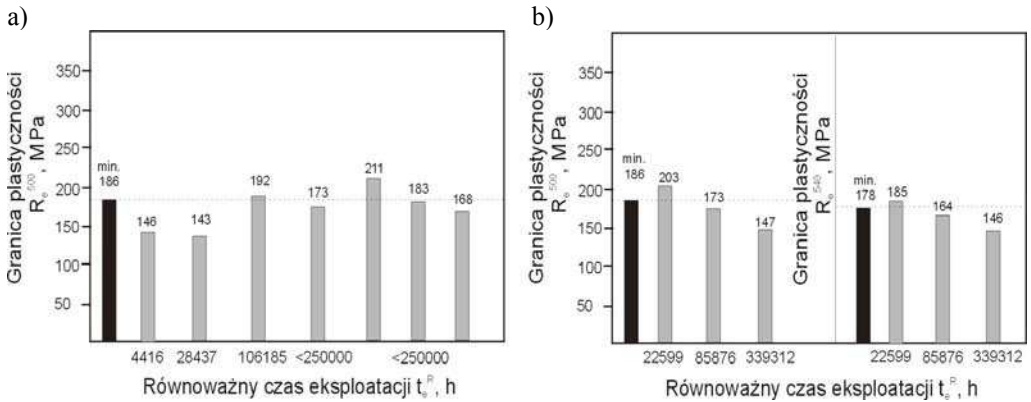
godzin praktycznie dla każdego z tych wycinków (rys. 40, 41). Wycinki elementów z martenzytycznej stali X20CrMoV11-1 zachowują granicę plastyczności w temperaturze 550°C o wartości wyższej od minimalnej wymaganej wartości dla stanu wyjściowego do 200 000 godzin pracy. Po jeszcze dłuższym czasie pracy wycinków węzownic z tej stali, granica plastyczności ulega systematycznemu obniżaniu z wydłużaniem się czasu eksploatacji, zachowując jednak wartość wyższą od wartości wymaganej dla stanu wyjściowego, jeszcze długo po przekroczeniu 200 000 godzin pracy (rys. 42).



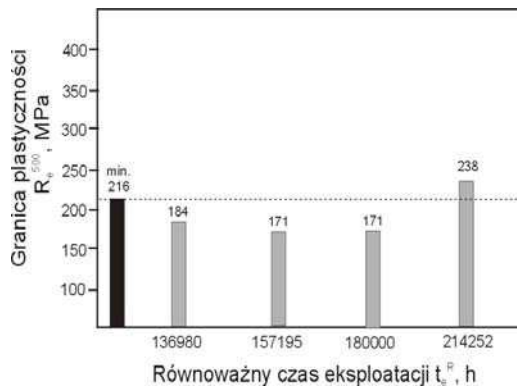
Rysunek 38. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 16Mo3: a) węzownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$



Rysunek 39. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5: a) węzownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$

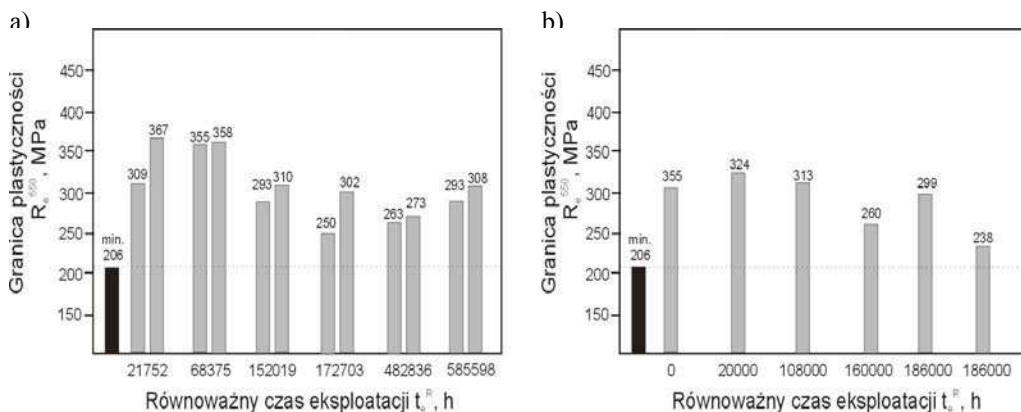


Rysunek 40. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze materiału elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 10CrMo9-10: a) wężownic przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

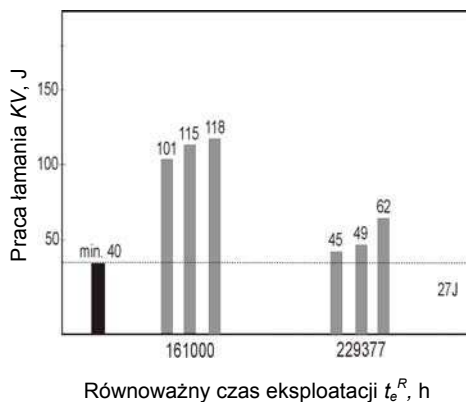


Rysunek 41. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

Wykonano również próby rozciągania w temperaturze podwyższonej, odpowiadającej temperaturze badania granicy plastyczności, której wyniki dla badanych stali przedstawiono w niniejszym rozdziale. Całkowite wydłużenie w tych próbach dla wszystkich badanych materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania było nie niższe od wartości wymaganej w temperaturze pokojowej dla rur z poszczególnych badanych stali w stanie wyjściowym. Jego wartość świadczy o zachowanej wystarczającej zdolności do odkształceń tych materiałów w warunkach eksploatacyjnych.



Rysunek 42. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania materiału elementów kotłów energetycznych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 na granicę plastyczności w podwyższonej temperaturze: a) węzownic przegrzewacza pary; $T_e^R = 570^\circ\text{C}$, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

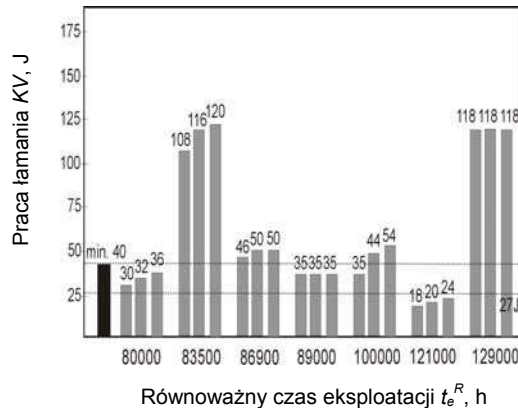


Rysunek 43. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na udarność w temperaturze pokojowej materiału komory przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotłów energetycznych wykonanych z niskostopowej stali 16Mo3; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$

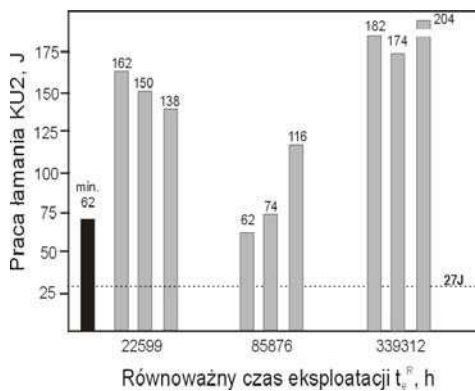
Istotną cechą świadczącą o zdolności do odkształceń materiału, oprócz wydłużenia w próbie rozciągania, jest wartość pracy łamania uzyskiwana w próbie udarności. Znajomość wartości tego wskaźnika daje możliwość przyjęcia w praktyce przemysłowej właściwej wartości temperatury prowadzenia wodnych prób ciśnieniowych oraz warunków uruchomienia i odstawiania kotła, dostosowanych do stanu tych materiałów po długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Badania te wykonano dla tych elementów, których grubość pozwalała

na pobranie próbek udarności tzn. wycinków rur z komór przegrzewacza oraz rurociągów pary. Wartość pracy łamania w temperaturze pokojowej zmierzonej na próbkach udarnościowych z karbem U2 lub V, pobranych równoległe do osi badanych wycinków rur, w zależności od równoważnego czasu eksploatacji t_e^R , przedstawiono na rysunkach 43-47.

Praca łamania badanych wycinków elementów ze stali 16Mo3 oraz 13CrMo4-5 po długotrwałej eksploatacji, nawet przekraczającej znacznie 100 000 godzin, pomimo obniżania się jej wartości, jest wyższa niż minimalna oczekiwana 27 J, ale często niższa niż wymagana

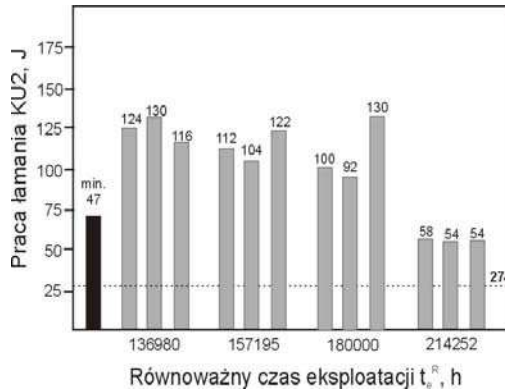


Rysunek 44. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na udarność w temperaturze pokojowej materiału komory przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotłów energetycznych wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$

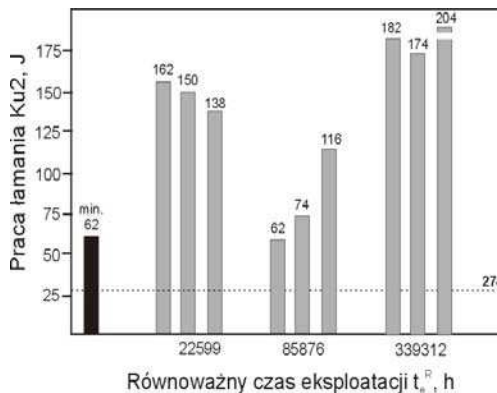


Rysunek 45. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na udarność w temperaturze pokojowej materiału komory przegrzewacza pary części ciśnieniowej kotłów energetycznych wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

minimalna dla stanu wyjściowego (rys. 43, 44). Podobnie zachowują się wycinki elementów po eksploatacji w warunkach pełzania ze stali 10CrMo9-10 (rys. 45). Natomiast stale 14MoV6-3 oraz X20CrMoV11-1 po długotrwałej eksploatacji w takich warunkach charakteryzują się niską wartością pracy łamania na próbkach z karbem V w temperaturze pokojowej, która już po 100 000 godzin pracy jest co najwyżej zbliżona do oczekiwanej minimalnej pracy łamania wynoszącej 27 J, a najczęściej od niej niższa, nie spełniając wymagań dotyczących minimalnej wartości dla stanu wyjściowego (rys. 46, 47).



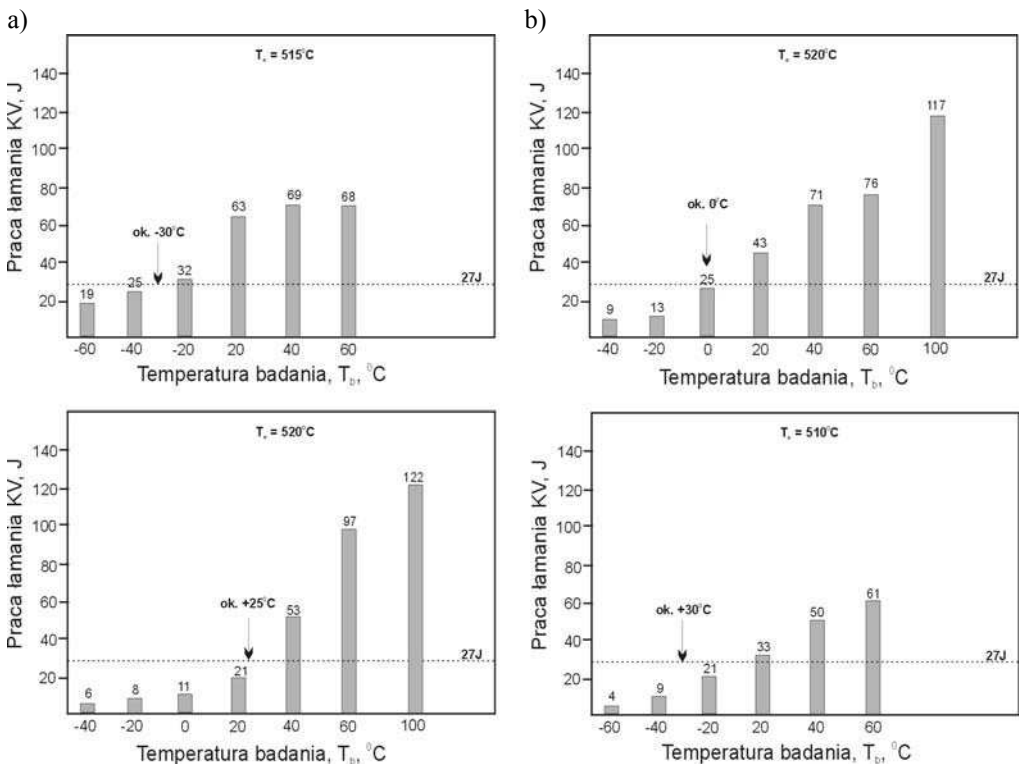
Rysunek 46. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na udarność w temperaturze pokojowej materiału wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$



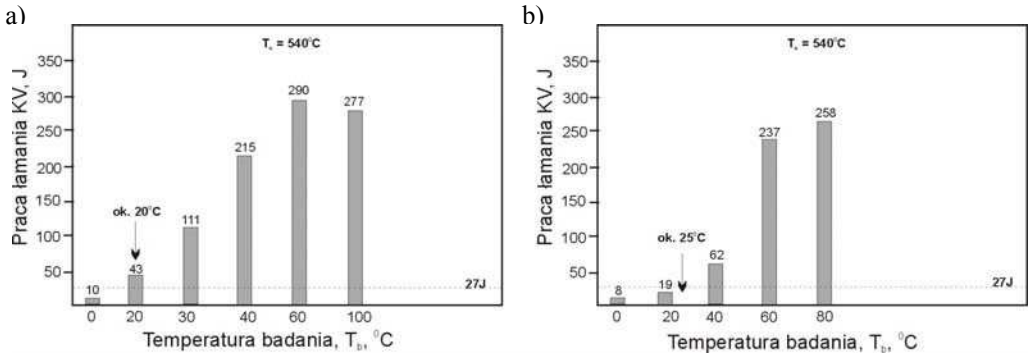
Rysunek 47. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na udarność w temperaturze pokojowej materiału komór części ciśnieniowej kotłów energetycznych z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

Oprócz znajomości rzeczywistych wartości pracy łamania w próbach udarności w temperaturze pokojowej dla badanych elementów części ciśnieniowej kotłów energetycznych będących w eksploatacji, istotną informacją jest również temperatura przejścia w stan kruchy (rys. 48-50). Temperatura ta odpowiada przelomom uzyskanym w próbie udarności o zbliżonym udziale przelomu o charakterze ciągliwym i kruchym (50/50%). W praktyce przyjmuje się, że stan taki odpowiada pracy łamania równej 27 J, uzyskiwanej na standardowych próbkach z karbem V.

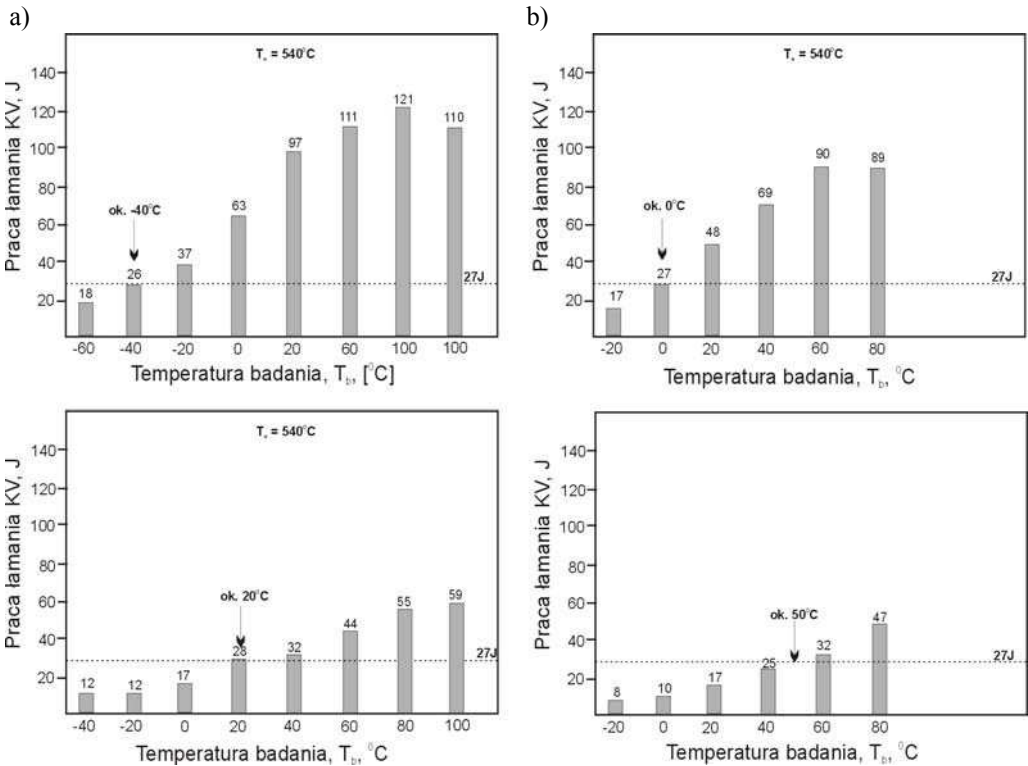
Potwierdzeniem są wyniki badań fraktograficznych przelomów złamanych próbek udarnościowych wykonane w skaningowym mikroskopie elektronowym. Wykazują one istotne różnice między stanem wyjściowym, gdy przelom jest ciągliwy, a stanem po długotrwałej eksploatacji, gdy jest on zdominowany przez składową łupliwą, a pękanie następuje zarówno międzykryształicznie po granicach ziarn, jak również transkryształicznie.



Rysunek 48. Wyniki badań pracy łamania w próbach udarności KV w zależności od temperatury badania wraz z wyznaczoną temperaturą przejścia w stan kruchy materiałów głównych rurociągów parowych kotłów energetycznych ze stali 13CrMo4-5 po eksploatacji przez: a) 64 800 godzin, b) 100 000 godzin, c) 121 500 godzin, d) 270 000 godzin



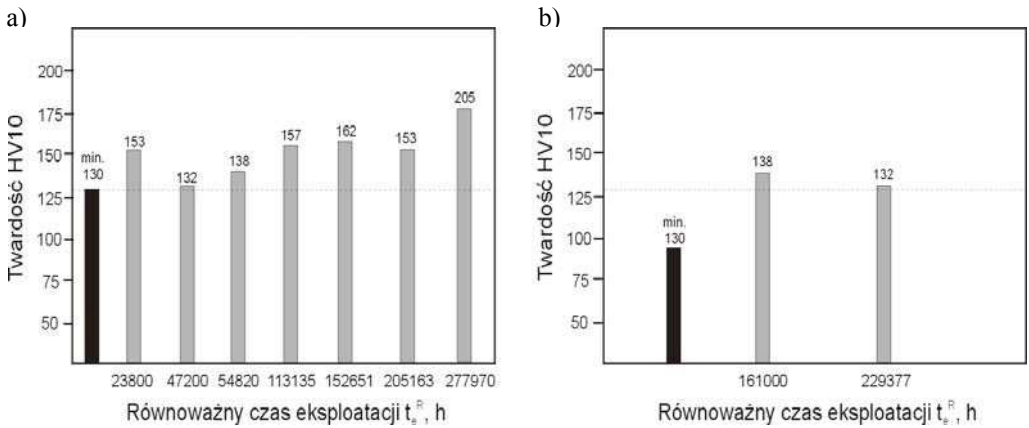
Rysunek 49. Wyniki badań pracy łamania w próbach udarności KV w zależności od temperatury badania wraz z wyznaczoną temperaturą przejścia w stan kruchy materiałów głównych rurociągów parowych kotłów energetycznych ze stali 14MoV6-3 po eksploatacji przez: a) 105 000 godzin, b) 193 000 godzin



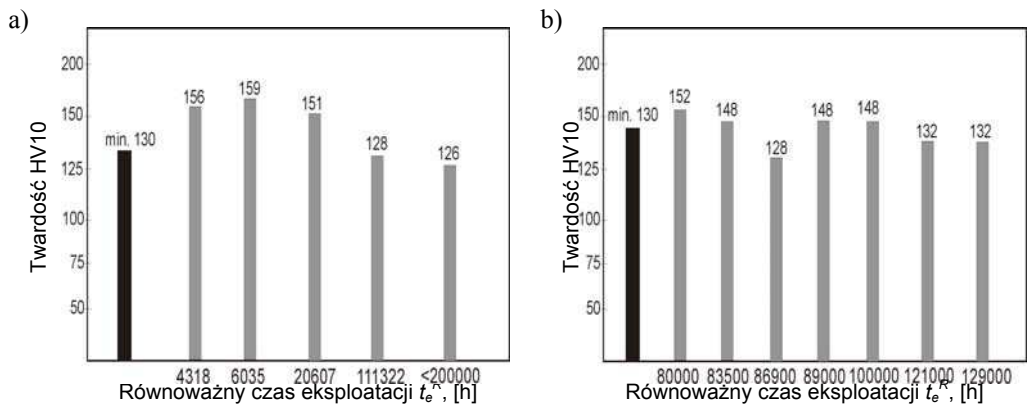
Rysunek 50. Wyniki badań pracy łamania w próbach udarności KV w zależności od temperatury badania wraz z wyznaczoną temperaturą przejścia w stan kruchy materiałów komór przegrzewacza pary kotłów energetycznych ze stali X20CrMoV11-1 po eksploatacji przez: a) w stanie wyjściowym, b) 20 000 godzin, c) 108 000 godzin, d) 160 000 godzin, w zbliżonych warunkach eksploatacyjnych

Długotrwała eksploatacja w warunkach pełzania powoduje również obniżanie się twardości. Wpływ długotrwałej eksploatacji na twardość badanych materiałów w postaci zależności twardości HV10 do równoważnego czasu eksploatacji t_e^R odniesionego do minimalnej wartości twardości oczekiwanej dla stanu wyjściowego badanych stali pokazano na rysunkach 51-55.

Twardość wszystkich badanych materiałów w wyniku eksploatacji w warunkach pełzania ulega systematycznemu obniżaniu się. Dla stali o strukturze ferrytyczno-perlitycznej, do których należą stale 16Mo3 i 13CrMo4-5, spadek twardości jest wolniejszy niż dla pozostałych



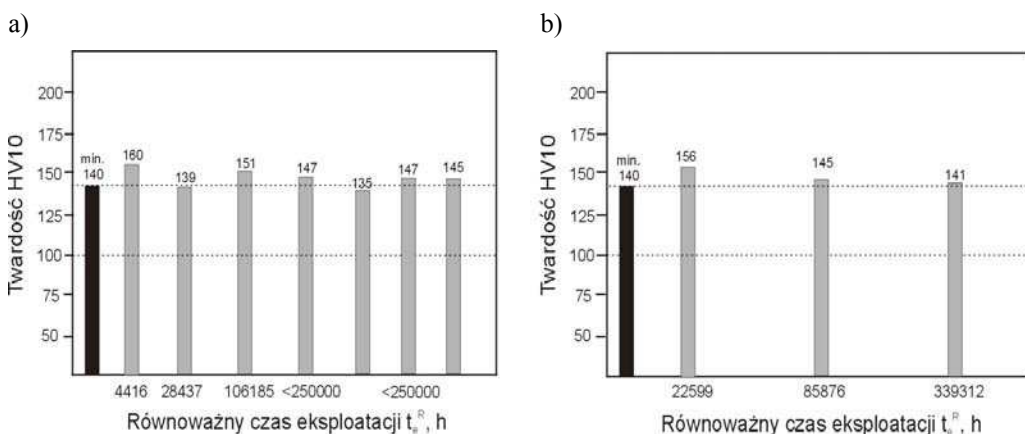
Rysunek 51. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość materiału elementów krytycznych kotła z niskostopowej stali 16Mo3: a) wężownica przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 500^\circ\text{C}$



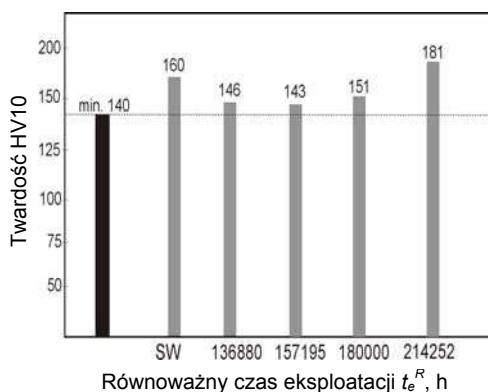
Rysunek 52. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość materiału elementów krytycznych kotła z niskostopowej stali 13CrMo4-5: a) wężownica przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary; $T_e^R = 520^\circ\text{C}$

badanych gatunków stali i tym mniejszy im mniejszy jest udział obszarów perlitu w strukturze. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość na przykładzie wybranych wycinków elementów krytycznych kotła z niskostopowej stali 16Mo3 przedstawiono na rysunku 51, natomiast dla stali 13CrMo4-5 na rysunku 52.

Dla stali o strukturze ferrytyczno-bainitycznej, do których należą stale 10CrMo9-10 oraz 14MoV6-3, twardość najczęściej utrzymuje się na poziomie minimalnej oczekiwanej dla stanu wyjściowego wartości 140 HV10 i wyższej przez bardzo długi czas eksploatacji przekraczający 200 000 godzin (rys. 53, 54). Dla stali X20CrMoV11-1 o strukturze odpuszczonego



Rysunek 53. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość materiału elementów krytycznych kotła z niskostopowej stali 10CrMo9-10: a) węzłowniczka przegrzewacza pary, b) komór przegrzewacza pary i rurociągów pary wtórnej: $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

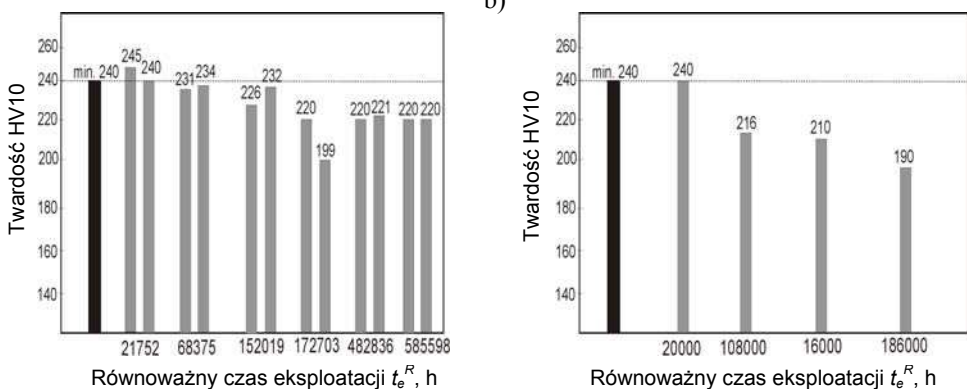


Rysunek 54. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość materiału elementów rurociągów z niskostopowej stali 14MoV6-3; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

martenzytu przyjmuje się twardość 230 HV10 jako minimalną oczekiwaną dla materiału w stanie wyjściowym. Ulega ona systematycznemu obniżaniu się i po ok. 100 000 godzin eksploatacji, przy typowych dla niej warunkach pracy, wynosi od 200 do 220 HV10, a po czasie eksploatacji dłuższym niż 150 000 godzin najczęściej jest poniżej 200 HV10. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość na przykładzie wybranych materiałów elementów krytycznych kotła z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1 przedstawiono na rysunku 55.

Spośród wszystkich własności mechanicznych najbardziej istotną i decydującą o przydatności do eksploatacji w warunkach pełzania są jednak własności wyznaczane w wyniku prób pełzania. Wytrzymałość na pełzanie, będąca podstawą do obliczeń projektowych, decyduje o zdolności do przenoszenia obciążeń eksploatacyjnych elementów wykonanych z badanych materiałów. Długotrwała eksploatacja każdego z badanych materiałów powoduje obniżanie się czasowej wytrzymałości na pełzanie. Nie może być ona niższa niż o 20% od wartości średniej przyjmowanej do obliczeń dla założonego wymaganego czasu eksploatacji. Istotną jest zatem znajomość, dla różnych stanów materiału po różnym czasie eksploatacji, wartości tej obniżonej wytrzymałości na pełzanie, definiowanej jako trwałość resztkowa lub resztkowa wytrzymałość na pełzanie. Wymaga to wykonania prób pełzania wycinków elementów po eksploatacji z badanych gatunków stali.

Standardowa próba pełzania dla różnych stanów materiału po różnym czasie eksploatacji polega na rozciąganiu próbki, poddanej stałemu obciążeniu w stałej temperaturze. Próba pełzania jest metodą znormalizowaną i przeprowadza się ją zgodnie z normą PN-EN ISO 203.

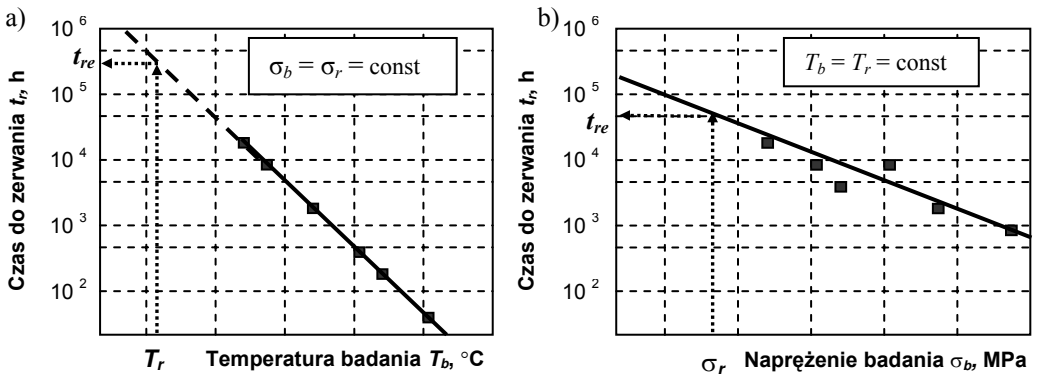


Rysunek 55. Wpływ długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania na twardość materiału elementów przegrzewaczy pary z wysokochromowej stali X20CrMoV11-1:
a) wężownicz; $T_e^R = 570^\circ\text{C}$, b) komór wylotowych; $T_e^R = 540^\circ\text{C}$

Próby pełzania można podzielić na:

- próby bez pomiaru wydłużenia podczas trwania próby,
- próby z pomiarem wydłużenia w czasie trwania próby.

Na podstawie wyników badań prób pełzania do zerwania bez pomiaru wydłużenia w czasie trwania próby można wyznaczyć wytrzymałość na pełzanie oraz całkowite wydłużenie po zerwaniu. Natomiast w próbach z pomiarem wydłużenia, nie prowadzonych do zerwania, można wyznaczyć czasową granicę pełzania oraz prędkość pełzania w stanie ustalonym, a w próbach prowadzonych do zniszczenia również wytrzymałość na pełzanie. Wielkością wynikową w próbach pełzania jest czas. Aby ich wyniki można było uznać za wiarygodne muszą być prowadzone w warunkach temperaturowo-naprężeniowych zbliżonych do eksploatacyjnych. Wówczas czas prób jest długi i oczekiwanie na wyniki badań to minimum kilka a nawet kilkanaście lat. Nawet stosowane różne metody ekstrapolacji nie są wystarczające do skrócenia czasu oczekiwania, gdyż wartości uzyskane w wyniku ekstrapolacji wymagają potwierdzenia wynikami długotrwałych prób pełzania. Wadą sposobu wyznaczania trwałości resztkowej jest zatem czas oczekiwania na wyniki badań trwający co najmniej 3 do 5 lat. W celu skrócenia czasu wykonywania badań pełzania i oceny trwałości resztkowej w praktyce inżynierskiej stosowane są tzw. skrócone próby pełzania o czasie trwania od kilkudziesięciu do kilku tysięcy godzin. Stwarza to możliwość uzyskania wyników badań w ciągu maksimum kilkunastu miesięcy, umożliwiając oszacowanie trwałości resztkowej.

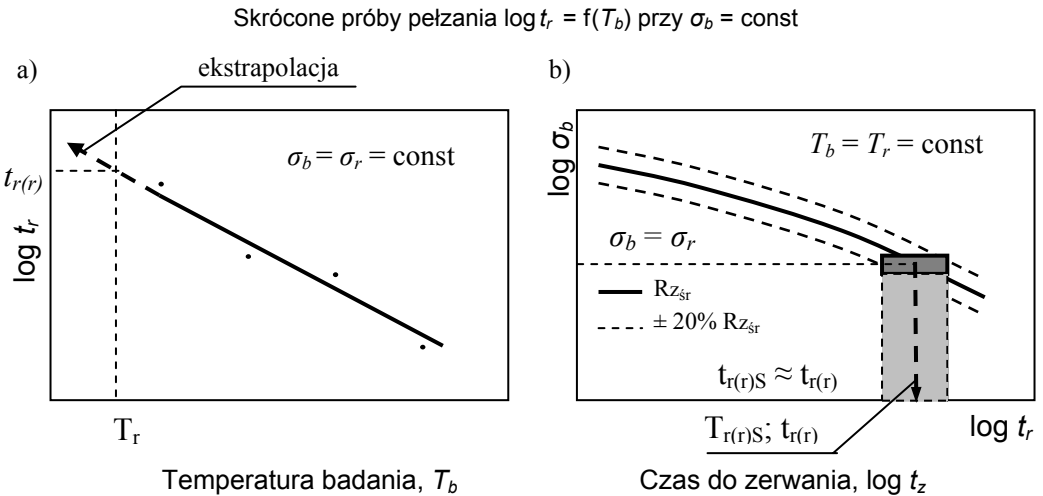


Rysunek 56. Sposób przedstawiania wyników skróconych prób pełzania w postaci:
a) zależność czasu do zerwania t_r w przyspieszonych próbach pełzania od temperatury badania T_b przy stałym naprężeniu badania $\sigma_b = \text{const}$ odpowiadającym robocznemu σ_r ,
b) zależność czasu do zerwania t_r w skróconych próbach pełzania od naprężenia badania σ_b w stałej temperaturze badania $T_b = \text{const}$ odpowiadającej roboczej T_r .

Przyspieszenie procesu pełzania oraz skrócenie okresu wykonywania badań uzyskuje się w próbach pełzania wykonywanych przy jednoosiowym rozciąganiu na próbkach pobranych z wycinka elementu instalacji energetycznej przez wykonywanie prób:

- przy stałym naprężeniu badania, odpowiadającym eksploatacyjnemu i różnych wartościach temperatury badania, znacznie wyższej od temperatury eksploatacyjnej,
- w stałej temperaturze badania, odpowiadającej eksploatacyjnej i przy różnych wartościach naprężenia badania, znacznie wyższych od naprężeń roboczych.

Sposób przedstawiania wyników skróconych prób pełzania wykonywanych przy stałym naprężeniu badania, odpowiadającym roboczemu ($\sigma_b = \sigma_r = \text{const}$) dla różnych wartości temperatury badania T_b w postaci zależności $\log t_r = f(T_b)$ przy $\sigma_b = \text{const}$ oraz wykonywanych w stałej temperaturze, odpowiadającej eksploatacyjnej ($T_b = T_r = \text{const}$) i przy różnych wartościach naprężenia badania σ_b w postaci zależności $t_r = f(\sigma_b)$ przy $T_b = \text{const}$ przedstawiono na rysunku 56.



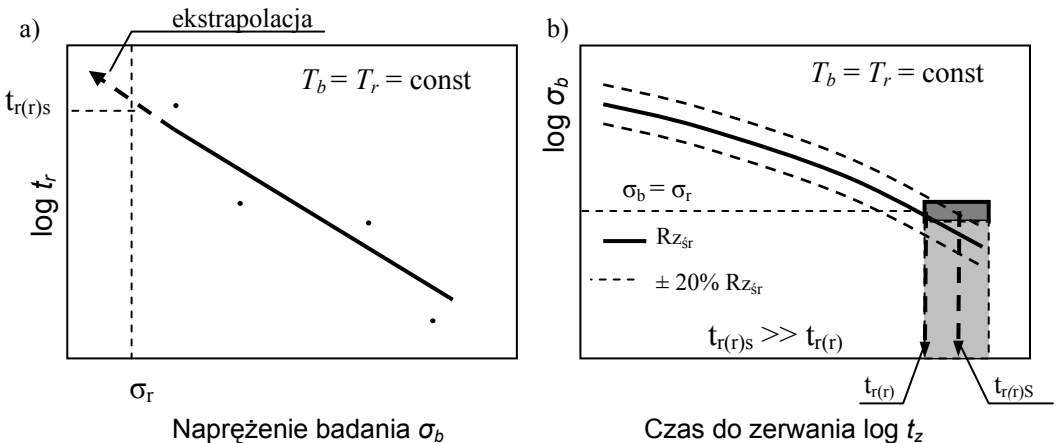
Rysunek 57. Wiarygodność oszacowania czasu do zerwania t_r dla parametrów roboczych w oparciu o wyniki skróconych prób pełzania przy stałym naprężeniu badania odpowiadającym roboczemu $\sigma_b = \sigma_r = \text{const}$;

T_b – temperatura badania, T_r – temperatura robocza, σ_b – naprężenie badania, σ_r – naprężenie robocze, t_r – czas do zerwania, $R_{z_{sr}}$ – średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie (wynik długotrwałych prób pełzania), $t_{r(r)S}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w skróconych próbach pełzania jako wynik ekstrapolacji, $t_{r(r)}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w długotrwałych próbach pełzania

W przypadku skróconych prób pełzania przy stałym naprężeniu, czas do zerwania t_r , na podstawie ekstrapolacji prostej w kierunku temperatury eksploatacji (rys. 57a), jest oszacowany z błędem nie przekraczającym 20% w stosunku do czasu wyznaczonego na podstawie wyników długotrwałych prób pełzania, a szacunek jest co najwyżej zaniżony, ale mieści się w paśmie dopuszczalnego rozrzutu prób długotrwałych (rys. 57b). Natomiast w przypadku skróconych prób pełzania prowadzonych w stałej temperaturze badania T_b czas do zerwania t_r na podstawie ekstrapolacji prostej w kierunku naprężenia eksploatacyjnego (rys. 58a) jest szacowany z błędem znacznie większym, przy większym rozrzucie uzyskiwanych wyników badań, a szacunek jest najczęściej znacznie zawyżony, co jest wynikiem zbyt optymistycznym.

Duża zbieżność wyników uzyskiwanych w próbach skróconych i długotrwałych umożliwia stosowanie w praktyce tej metody z wykorzystaniem skróconych prób pełzania przy stałym naprężeniu. Jednak wiarygodność uzyskiwanych wyników badań i oszacowania czasu do zerwania t_r dla wymaganej temperatury roboczej T_r (uzyskiwanego w wyniku ekstrapolacji

Skrócone próby pełzania $\log t_z = f(\sigma_b)$ przy $T_b = \text{const}$



Rysunek 58. Wiarygodność oszacowania czasu do zerwania t_z dla parametrów roboczych w oparciu o wyniki skróconych prób pełzania w stałej temperaturze odpowiadającej eksploatacyjnej $T_b = T_r = \text{const}$;

T_b – temperatura badania, T_r – temperatura robocza, σ_b – naprężenie badania, σ_r – naprężenie robocze, t_r – czas do zerwania, Rz_{sr} – średnia czasowa wytrzymałość na pełzanie (wynik długotrwałych prób pełzania), $t_{z(r)S}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w skróconych próbach pełzania jako wynik ekstrapolacji, $t_{r(r)}$ – czas do zerwania dla parametrów roboczych uzyskany w długotrwałych próbach pełzania

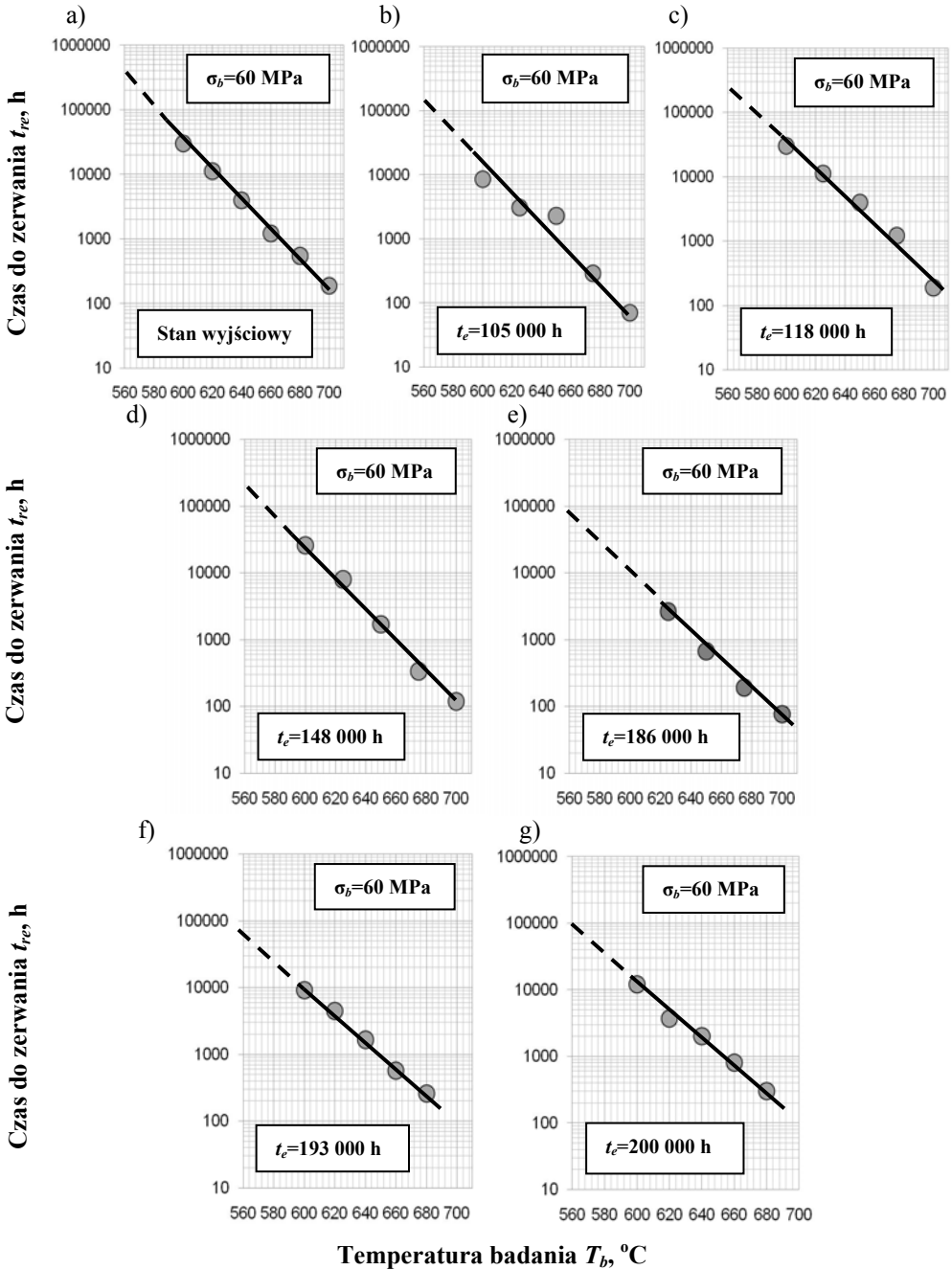
wyznaczonej prostej) uwarunkowane są zachowaniem stałej temperatury w trakcie wykonywania prób pełzania na długości pomiarowej próbki przez cały czas trwania próby. Wymaga to wykonywania badań wyłącznie w specjalistycznym laboratorium pełzania. Natomiast wadą tej metody jest ograniczenie w zakresie stosowanych wartości temperatury badania, wynikające z zachodzących w materiale procesów wydzieleniowych. Wartości temperatury muszą być zatem dobierane indywidualnie dla każdego badanego gatunku materiału.

Na podstawie blisko 40-letniej praktyki autora w zakresie porównywania wyników skróconych prób pełzania i ich ekstrapolacji z wynikami prób długotrwałych do 100 000 godzin stwierdzono, że porównanie wyników skróconych prób pełzania i ich ekstrapolacji z wynikami długotrwałych prób pełzania, daje możliwość stosowania wyników tych prób, zarówno materiału w stanie wyjściowym jak i po długotrwałej eksploatacji, dla określenia trwałości, której miarą jest czas do zerwania t_r . Dotyczy to jednak tylko prób wykonywanych w temperaturze wyższej od temperatury eksploatacyjnej przy stałym naprężeniu odpowiadającym warunkom dalszej pracy. Wówczas wyznaczenie czasu do zerwania t_r nie wymaga dla materiału po eksploatacji znajomości historii i warunków dotychczasowej eksploatacji elementu, wymaga natomiast znajomości warunków roboczych dalszej pracy (σ_r, t_r).

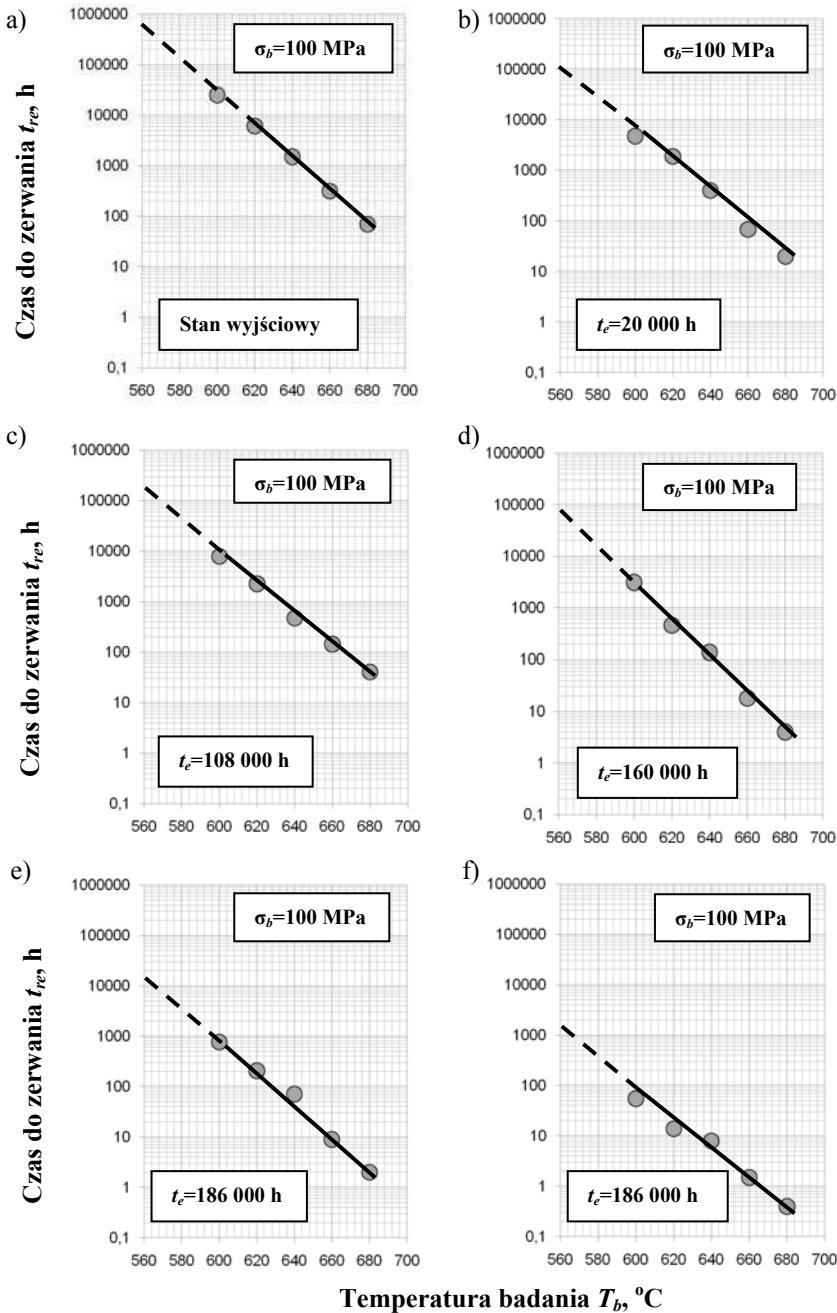
W dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono wyniki skróconych prób pełzania wybranych wycinków głównych rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 oraz komór wylotowych przegrzewaczy pary ze stali X20CrMoV11-1 części ciśnieniowej kotłów energetycznych po różnym czasie eksploatacji od 100 000 do 200 000 godzin.

Badania wycinków elementów ze stali 14MoV6-3 wykonano przy stałej wartości naprężenia badania $\sigma_b = 60$ MPa, odpowiadającej eksploatacji w stałej temperaturze o różnej wartości z zakresu pomiędzy 600 a 700°C, czyli znacznie wyższej od przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji, w porównaniu z typowym stanem wyjściowym. Uzyskane rezultaty przedstawiono na rysunku 59. Na rysunku 60 zaprezentowano natomiast uzyskane wyniki badań wykonanych w stałej temperaturze o różnej wartości również z zakresu od 600 do 700°C przy stałej wartości naprężenia badania $\sigma_b = 100$ MPa odpowiadającego eksploatacyjnemu dla komór wykonywanych ze stali X20CrMoV11-1.

Wynik ekstrapolacji, do wartości temperatury odpowiadającej temperaturze dalszej eksploatacji, w postaci wyznaczonej trwałości resztkowej zestawiono odpowiednio w tablicy 7 dla stali 14MoV6-3 oraz w tablicy 8 dla stali X20CrMoV11-1 po różnym czasie eksploatacji i w nieco zróżnicowanej temperaturze.



Rysunek 59. Wyniki skróconych prób pełzania przy stałym poziomie naprężenia badania $\sigma_b = 60$ MPa materiału głównych rurociągów pary świeżej ze stali 14MoV6-3 po eksploatacji w warunkach pełzania w różnym czasie: a) w stanie wyjściowym, b) 105 000 h, c) 118 000 h, d) 148 000 h, e) 186 000 h, f) 193 000 h, g) 200 000 h



Rysunek 60. Wyniki skróconych prób pełzania przy stałym poziomie naprężenia badania $\sigma_b = 100$ MPa materiału komór przegrzewacza pary ze stali X20CrMoV11-1 po eksploatacji w warunkach pełzania w różnym czasie: a) w stanie wyjściowym, b) 20 000 h, c) 108 000 h, d) 160 000 h, e) 186 000 h, f) 186 000 h

Tablica 7. Trwałość resztkowa w temperaturze 550 i 560°C na podstawie skróconych prób pełzania badanych materiałów ze stali 14MoV6-3 po pracy w warunkach pełzania dla naprężenia badania odpowiadającego parametrom dalszej eksploatacji

Parametry dotychczasowej eksploatacji		Poziom naprężenia dalszej eksploatacji $\sigma_{ep} = 60$ MPa		
Temperatura T_{es} , °C	Czas t_{es} , h	Temperatura T_{ep} , °C	550	560
Stan wyjściowy			600 000	340 000
540	105 000	Trwałość resztkowa t_{re} , h	250 000	140 000
	118 000		450 000	280 000
	148 000		300 000	210 000
	186 000		85 000	50 000
	193 000		110 000	65 000
	200 000		85 000	50 000

Tablica 8. Trwałość resztkowa w temperaturze 540, 550 i 560°C na podstawie skróconych prób pełzania badanych materiałów ze stali X20CrMoV11-1 po pracy w warunkach pełzania dla naprężenia badania odpowiadającego parametrom dalszej eksploatacji

Parametry dotychczasowej eksploatacji		Poziom naprężenia dalszej eksploatacji $\sigma_{ep} = 100$ MPa			
Temperatura T_{es} , °C	Czas t_{es} , h	Temperatura T_{ep} , °C	540	550	560
Stan wyjściowy			720 000	350 000	180 000
540	20 000	Trwałość resztkowa t_{re} , h	150 000	65 000	35 000
540	108 000		210 000	110 000	60 000
540	160 000		110 000	45 000	20 000
540	186 000		25 000	12 000	5 500
540	186 000		2 100	1 050	550

Aby wyznaczyć charakterystykę czasowej wytrzymałości na pełzanie badanych materiałów po eksploatacji w warunkach pełzania poza obliczeniowy czas pracy, niezbędne jest wykonanie prób pełzania w warunkach temperaturowo-naprężeniowych umożliwiającym uzyskanie czasów do zerwania od kilku do kilkudziesięciu tysięcy godzin. Takie próby pełzania bez pomiaru wydłużenia w czasie trwania próby wykonano dla badanych niskostopowych stali 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 i 14MoV6-3. Badania stali 13CrMo4-5 były przedmiotem rozprawy doktorskiej autora [101], a cytowane w dalszej części niniejszego rozdziału wyniki uzyskane dla wycinków elementów po eksploatacji z tej stali przedstawiono dla porównania z wynikami badań uzyskanymi dla pozostałych gatunków badanych stali.

Próby pełzania wykonano w stałej temperaturze badania o dwóch różnych wartościach i przy różnych stałych wartościach naprężenia badania, kilkunastu dla każdego badanego wycinka elementu z każdego gatunku stali. Warunki wykonanych prób pełzania przedstawiono w tabelicy 9. Uzyskane wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów w układzie współrzędnych naprężenie badania σ_b w skali logarytmicznej od parametru Larsona-Millera ($L-M$) $\log \sigma_b = f(L-M)$, gdzie $L-M = T_b(C + \log t_r)$ przy czym; T_b – temperatura badania w K, t_r – czas do zerwania w godzinach, C – stała materiałowa. Uzyskane charakterystyki czasowej wytrzymałości na pełzanie posłużyły do wyznaczenia resztkowej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla naprężenia i temperatury odpowiadających rzeczywistym wartościom eksploatacyjnym. Wyznaczone wartości dla przewidywanej temperatury eksploatacji T_{ep} oraz wartości naprężenia σ_{ep} dalszej eksploatacji zestawiono w postaci tabelarycznej.

Na rysunku 62 przedstawiono wyniki długotrwałych prób pełzania wycinków komór przegrzewaczy pary ze stali 13CrMo4-5 nie wykazujących zapoczątkowania procesów uszkodzeń

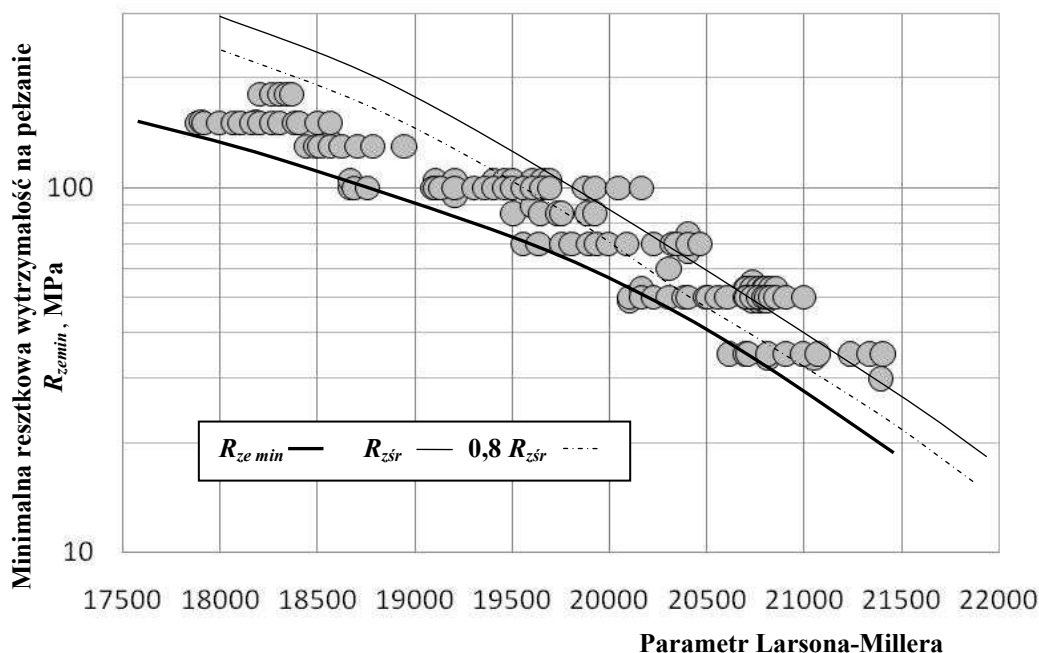
Tablica 9. Warunki długotrwałych prób pełzania badanych stali

Gatunek stali	Badane elementy kotła	Warunki badań			
		Stale naprężenie σ_b , MPa	Temperatura T_b , °C	Maksymalny czas pojedynczej próby, godziny	Łączny czas prób, godziny
13CrMo4-5	wycinki komór przegrzewaczy pary po długotrwałej eksploatacji, nie wykazujące zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania	180, 150, 125, 100, 85, 70	550	94 536	1 186 430
		125, 100, 85, 70, 50, 35, 30	600		
10CrMo9-10	elementy części ciśnieniowej kotła po długotrwałej eksploatacji, nie wykazujące zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania	200, 180, 160, 150, 125, 100	550	119 682	1 406 557
		125, 100, 85, 70, 60, 50, 45, 40, 30	600		
14MoV6-3	wycinki głównych rurociągów pary świeżej po długotrwałej eksploatacji, nie wykazujące zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania	200, 180, 160, 150, 125, 100	550	58 234	576 027
		125, 100, 85, 70, 60, 50, 45, 40, 30	600		

wewnętrznych w wyniku pełzania po długotrwałej eksploatacji, wykonanych w warunkach podanych w tablicy 9. W tablicy 10 zestawiono wyznaczoną trwałość resztkową dla temperatury $T_{ep} = 540, 545, 550$ i 555°C oraz trzech wartości naprężenia $\sigma_{ep} = 40, 50$ i 60 MPa.

Wyniki długotrwałych prób pełzania wycinków głównych rurociągów pary świeżej po długotrwałej eksploatacji wykonanych ze stali 14MoV6-3, nie wykazujących zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania, przedstawiono na rysunku 63. Badania wykonano w warunkach podanych w tablicy 9. Trwałość resztkową wyznaczoną dla temperatury $T_{ep} = 540, 545, 550$ i 555°C oraz trzech poziomów naprężenia $\sigma_{ep} = 60, 70$ i 80 MPa zestawiono w tablicy 11.

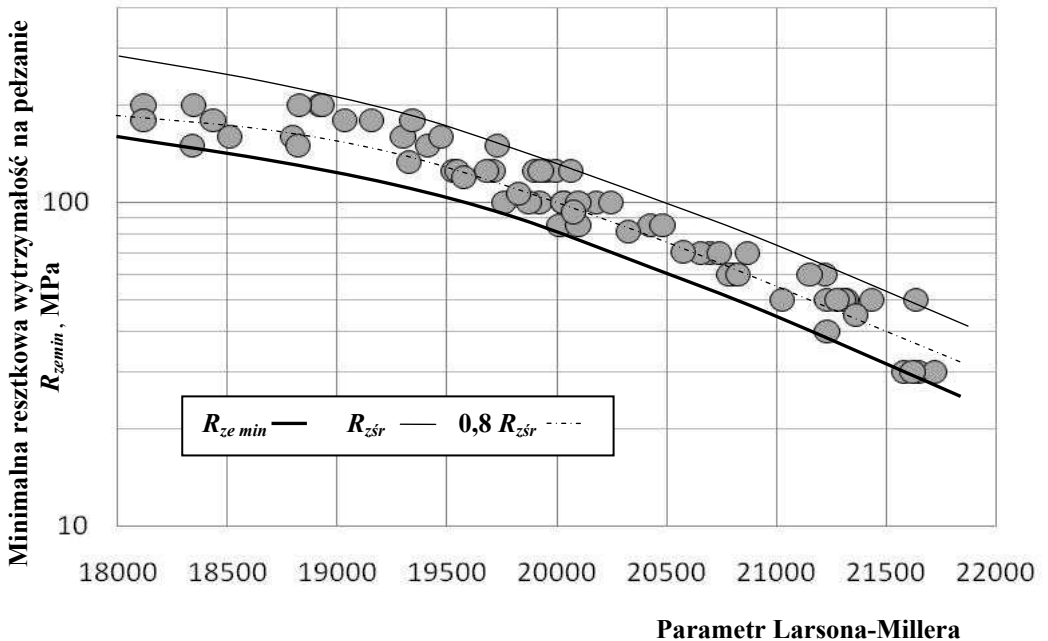
Na rysunku 64 przedstawiono natomiast wyniki długotrwałych prób pełzania materiałów elementów części ciśnieniowej kotła wykonanych ze stali 10CrMo9-10 nie wykazujących zapoczątkowania procesów uszkodzeń wewnętrznych w wyniku pełzania po długotrwałej eksploatacji. Badania te wykonano w warunkach podanych w tablicy 9. Dla temperatury $T_{ep} = 540, 545, 550$ i 555°C oraz trzech wartości naprężenia $\sigma_{ep} = 50, 60$ i 70 MPa wyznaczono trwałość resztkową, a uzyskane wartości zestawiono w tablicy 12.



Rysunek 62. Czasowa resztkowa wytrzymałość na pełzanie materiałów, o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń, wycinków komór przegrzewacza pary kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy

Tablica 10. Prognozowana minimalna trwałość resztkowa dla wybranych poziomów temperatury i naprężenia dla wybranych poziomów naprężenia dalszej eksploatacji na podstawie długotrwałych prób pełzania badanych materiałów o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń ze stali 13CrMo4-5 po pracy w warunkach pełzania

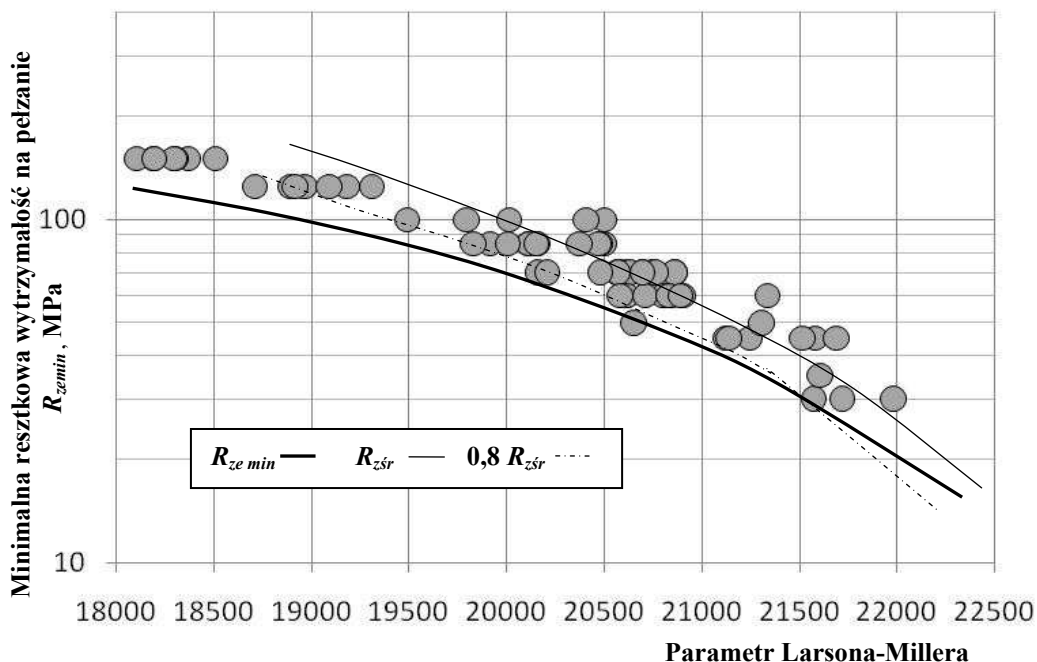
Przyjęta temperatura dalszej eksploatacji $T_e, ^\circ\text{C}$	Parametr Larsona-Millera L-M Minimalna trwałość resztkowa t_{re}, h	Poziom naprężenia dalszej eksploatacji σ_e		
		40 MPa	50 MPa	60 MPa
540	L-M	20 550	20 150	19 850
	t_{re}	189 000	61 000	26 000
545	L-M	20 550	20 150	19 850
	t_{re}	132 000	43 000	18 500
550	L-M	20 550	20 150	19 850
	t_{re}	93 000	30 000	13 000
555	L-M	20 550	20 150	19 850
	t_{re}	66 000	22 000	9 500



Rysunek 63. Czasowa resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$ materiałów, o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń, wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłowej energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy

Tablica 11. Prognozowana minimalna trwałość resztkowa dla wybranych poziomów temperatury i naprężenia dla wybranych poziomów naprężenia dalszej eksploatacji na podstawie długotrwałych prób pełzania badanych materiałów o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń ze stali 14MoV6-3 po pracy w warunkach pełzania

Przyjęta temperatura dalszej eksploatacji T_{es} , °C	Parametr Larsona-Millera L-M Minimalna trwałość resztkowa t_{re} , h	Poziom naprężenia dalszej eksploatacji σ_e		
		60 MPa	70 MPa	80 MPa
540	L-M	20 500	20 240	20 050
	t_{re}	164 000	78 500	46 000
545	L-M	20 500	20 240	20 050
	t_{re}	115 000	55 000	32 000
550	L-M	20 500	20 240	20 050
	t_{re}	81 000	30 000	23 000
555	L-M	20 500	20 240	20 050
	t_{re}	57 000	28 000	16 000



Rysunek 64. Czasowa resztkowa wytrzymałość na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(L-M)$ materiałów, o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń, elementów krytycznych kotła z niskostopowej stali 10CrMo9-10 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy

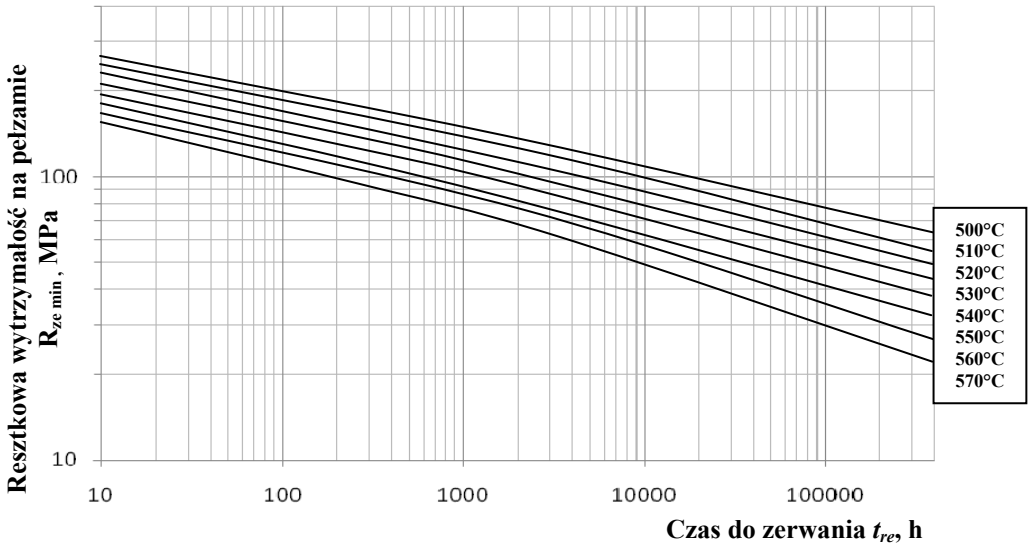
Tablica 12. Prognozowana minimalna trwałość resztkowa dla wybranych poziomów temperatury i naprężenia dla wybranych poziomów naprężenia dalszej eksploatacji na podstawie długotrwałych prób pełzania badanych materiałów o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń ze stali 10CrMo9-10 po pracy w warunkach pełzania

Przyjęta temperatura dalszej eksploatacji $T_e, ^\circ\text{C}$	Parametr Larsona-Millera L-M Minimalna trwałość resztkowa t_{re}, h	Poziom naprężenia dalszej eksploatacji σ_e		
		50 MPa	60 MPa	70 MPa
540	L-M	20 650	20 300	20 000
	t_{re}	251 000	93 000	40 000
545	L-M	20 650	20 300	20 000
	t_{re}	176 000	65 000	28 000
550	L-M	20 650	20 300	20 000
	t_{re}	123 000	46 000	20 000
555	L-M	20 650	20 300	20 000
	t_{re}	87 000	33 000	14 000

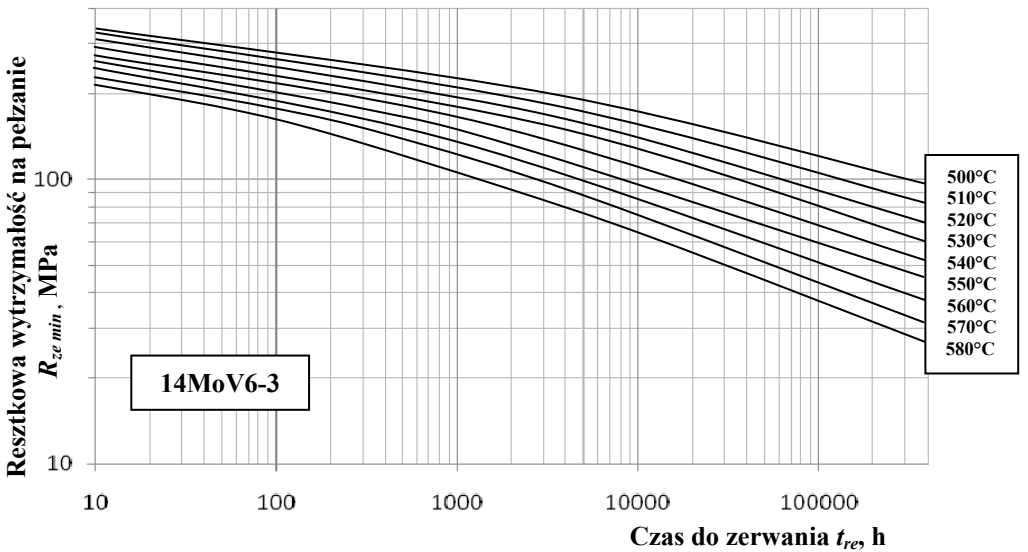
Uzyskane wyniki badań pełzania przedstawione na wykresach zbiorczych w postaci parametrycznej krzywej Larsona-Millera resztkowej wytrzymałości na pełzanie pozwoliły ponadto na wyznaczenie krzywej minimalnej resztkowej wytrzymałości na pełzanie ($R_{ze\ min}$) dla badanych materiałów po eksploatacji bez uszkodzeń wewnętrznych. Wyznaczone krzywe odniesiono do krzywej średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie ($R_{z\ sr}$) według wymagań dla stanu wyjściowego badanej stali oraz krzywej odpowiadającej dolnej granicy dopuszczalnego pasma rozrzutu -20% ($0,8 R_{z\ sr}$) w stosunku do tej wartości średniej.

W oparciu o transformację wyznaczonej krzywej $R_{ze\ min}$ sporządzono charakterystyki trwałości resztkowej materiałów po eksploatacji bez uszkodzeń wewnętrznych w postaci zależności $\log \sigma_b = f(\log t_r)$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej pracy badanych niskostopowych stali po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy, które pokazano odpowiednio dla stali: 13CrMo4-5 na rysunku 65, 14MoV6-3 na rysunku 66 oraz 10CrMo9-10 na rysunku 67.

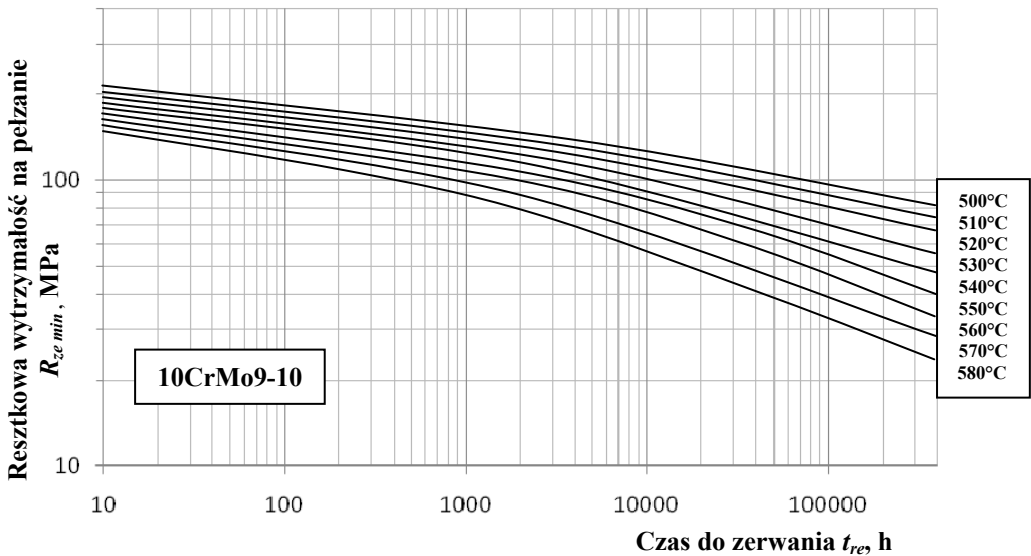
Na podstawie wyników wieloletnich badań własnych można zatem stwierdzić, że resztkowa wytrzymałość na pełzanie maleje z wydłużeniem czasu eksploatacji, a jej wartość, szczególnie po czasie eksploatacji dłuższym niż obliczeniowy, jest najczęściej znacznie poniżej wartości średniej wymaganej dla materiału w stanie wyjściowym. Kiedy czas eksploatacji



Rysunek 65. Charakterystyki minimalnej resztkowej czasowej wytrzymałości na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(\log t_r)$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 13CrMo4-5 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń



Rysunek 66. Charakterystyki minimalnej resztkowej czasowej wytrzymałości na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(\log t_r)$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń

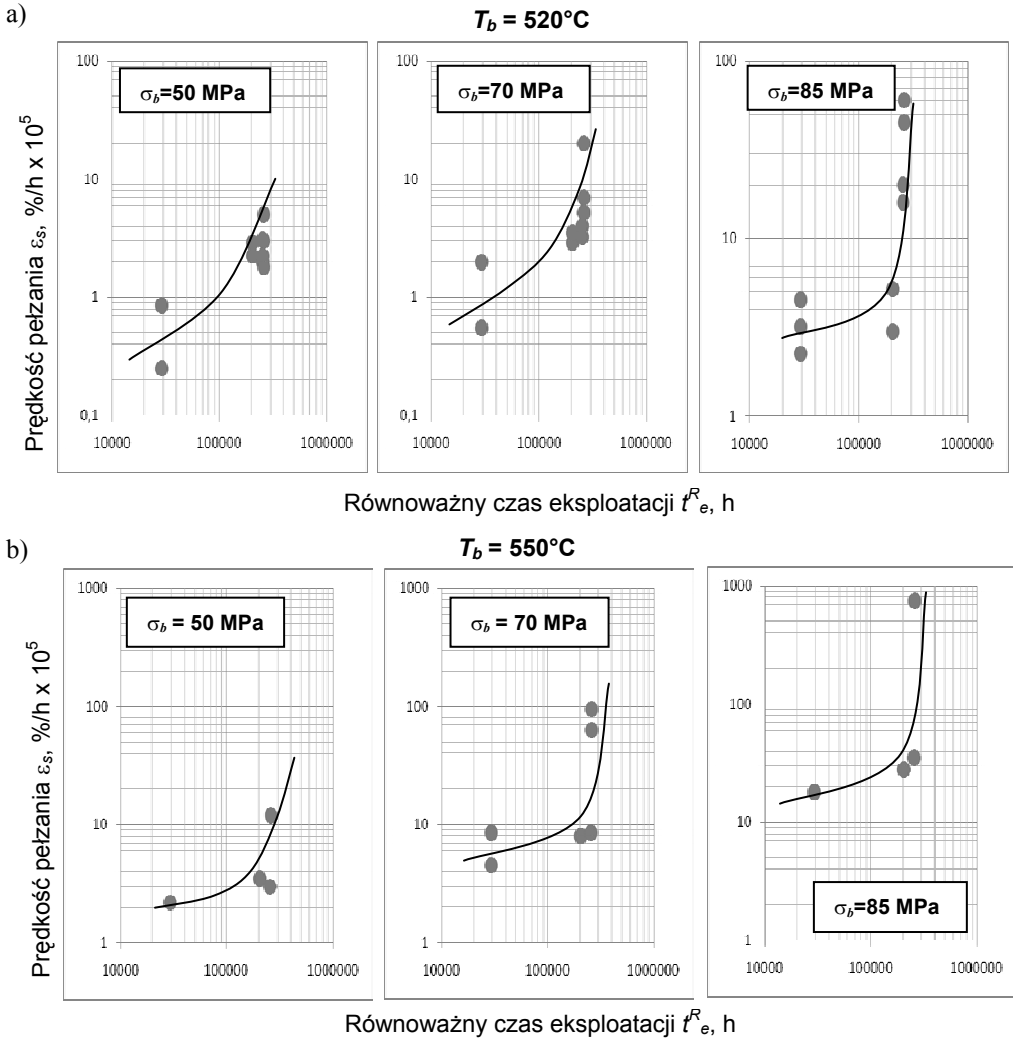


Rysunek 67. Charakterystyki minimalnej resztkowej czasowej wytrzymałości na pełzanie w postaci zależności $\log \sigma_b = f(\log t_r)$ dla różnych poziomów przewidywanej temperatury dalszej eksploatacji niskostopowej stali 10CrMo9-10 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy o niezapoczątkowanym procesie wewnętrznych uszkodzeń

wynosi ok. 1,5 obliczeniowego i więcej, to wówczas resztkowa wytrzymałość na pełzanie jest często poniżej wartości odpowiadającej dopuszczalnemu dolnemu pasmu rozrzutu -20% ($0,8 R_{zsr}$) wymaganej wartości średniej dla stanu wyjściowego. Również trwałość resztkowa, będąca w praktyce czasem do zniszczenia materiału dla wymaganych eksploatacyjnych warunków temperaturowo-naprężeniowych, obniża się i dla materiałów o czasie eksploatacji przekraczającym czas obliczeniowy stanowi ok. połowę, a po przekroczeniu obliczeniowego czasu obniża się ok. 1,5 razy do ok. 0,25 czasu uzyskiwanego dla materiału w stanie wyjściowym.

Oprócz resztkowej wytrzymałości na pełzanie istotnym wskaźnikiem w ocenie przydatności do dalszej eksploatacji i w określaniu czasu dalszej bezpiecznej pracy jest prędkość pełzania w drugim jego stadium, tzn. w stanie ustalonym.

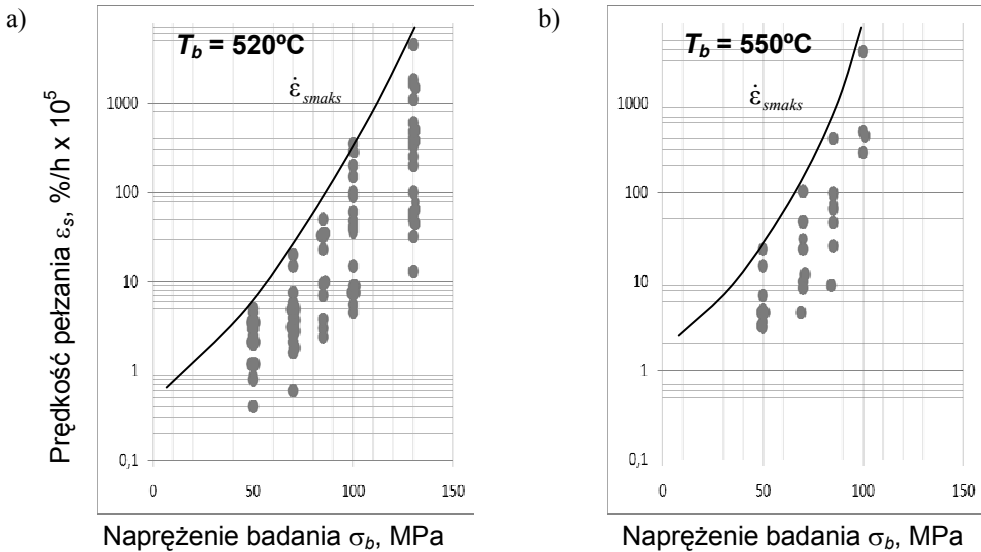
Dla wyznaczania prędkości pełzania w drugim jego stadium wykonywane są próby pełzania z rejestracją wydłużenia w czasie próby, wykonywane w stałej temperaturze badania przy stałej wartości naprężenia badania. Prędkość pełzania każdorazowo jest wyznaczana z krzywej pełzania w układzie współrzędnych wydłużenie w wyniku pełzania ϵ od czasu trwania próby pełzania t $\{\epsilon = f(t)$ przy σ_b i $T_b = \text{const}\}$.



Rysunek 68. Prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w funkcji równoważnego czasu eksploatacji t_e^R przy stałym poziomie naprężenia σ materiałów komór przegrzewaczy pary kotłów energetycznych z niskostopowej stali 13CrMo4-5 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy w temperaturze dalszej eksploatacji:

a) 520°C , b) 550°C (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 520^\circ\text{C}$)

W dalszej części niniejszego rozdziału przedstawiono wyniki badań prędkości pelzania dla wycinków elementów z niskostopowych stali 13CrMo4-5, 10CrMo9-10 oraz 14MoV6-3 po różnym czasie eksploatacji w temperaturze 520 i 550°C i przy naprężeniu 50, 70, 85, 100 i 125 MPa. Czas trwania prób uzależniony od zadanego poziomu temperatury i naprężenia wyniósł od ok. 2500 do ok. 6000 godzin.



Rysunek 69. Maksymalna prędkość pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_{s_{maks}}$ w zależności od naprężenia badania σ_b materiałów elementów komór przegrzewaczy pary kotła po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy wykonanych z niskostopowej stali 13CrMo4-5 dla temperatury dalszej eksploatacji: a) $520^\circ C$, b) $550^\circ C$ (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 520^\circ C$)

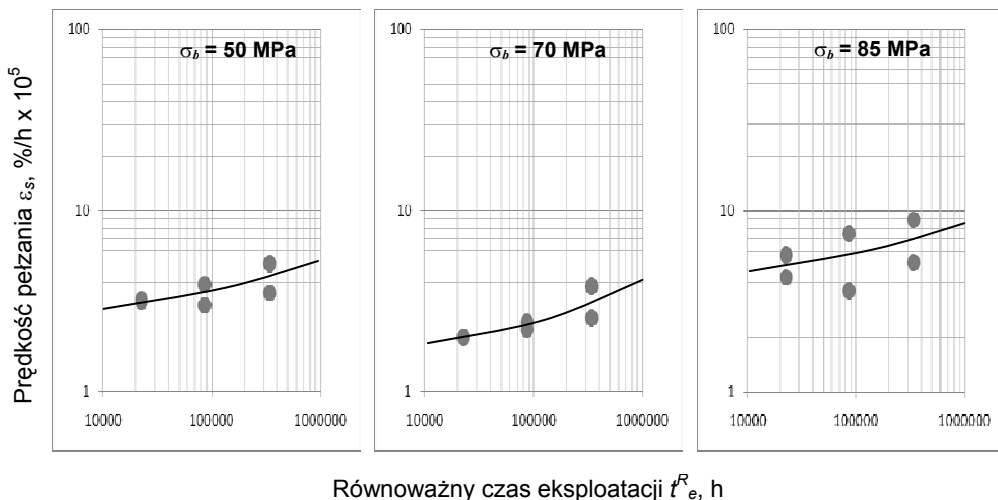
Zależność prędkości pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ od równoważnego czasu eksploatacji t_e^R przy stałym naprężeniu badania σ_b wycinków elementów części ciśnieniowej kotła po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy dla temperatury dalszej eksploatacji 520 i $550^\circ C$ wykonanych ze stali 13CrMo4-5 przedstawiono na rysunku 68, ze stali 10CrMo9-10 na rysunku 70 oraz ze stali 14MoV6-3 na rysunku 72.

Na rysunkach 69, 71 i 73 przedstawiono natomiast zależność prędkości pełzania $\dot{\epsilon}_s$ od naprężenia badania σ_b w stałej temperaturze badania T_b dla badanych wycinków elementów z tych stali po eksploatacji.

Dla tak sporządzonych zależności wyznaczono krzywe maksymalnej prędkości pełzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_{s_{maks}}$ dla tych stali po eksploatacji w warunkach pełzania bez wewnętrznych uszkodzeń. Prędkość pełzania $\dot{\epsilon}_s$ badanych materiałów po eksploatacji dłuższej niż obliczeniowy czas pracy rośnie z czasem eksploatacji. W temperaturze niższej ($520^\circ C$) prędkość pełzania materiału po eksploatacji ok. 200 000 godzin wzrasta ponad dwukrotnie w stosunku do materiału po ok. 100 000 godzin. W temperaturze wyższej ($550^\circ C$) prędkość pełzania

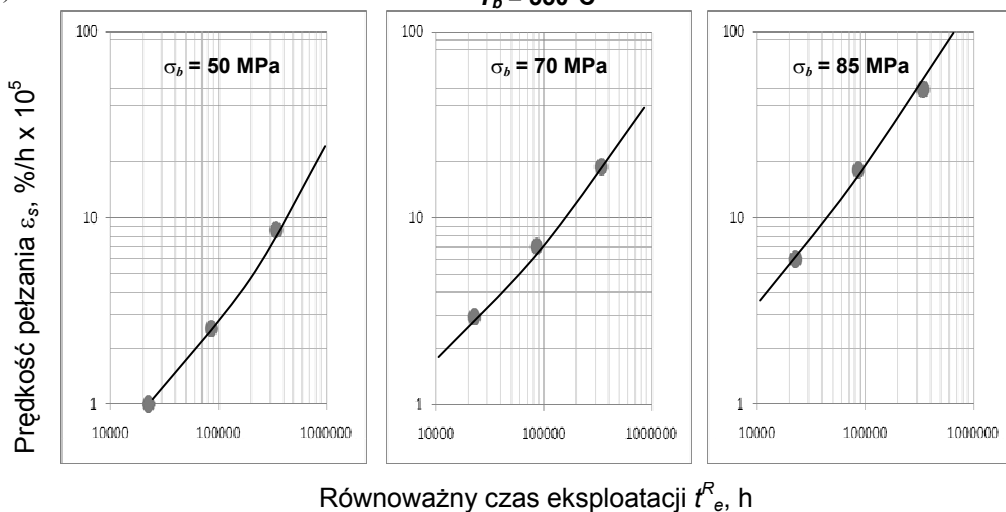
a)

$T_b = 520^\circ\text{C}$



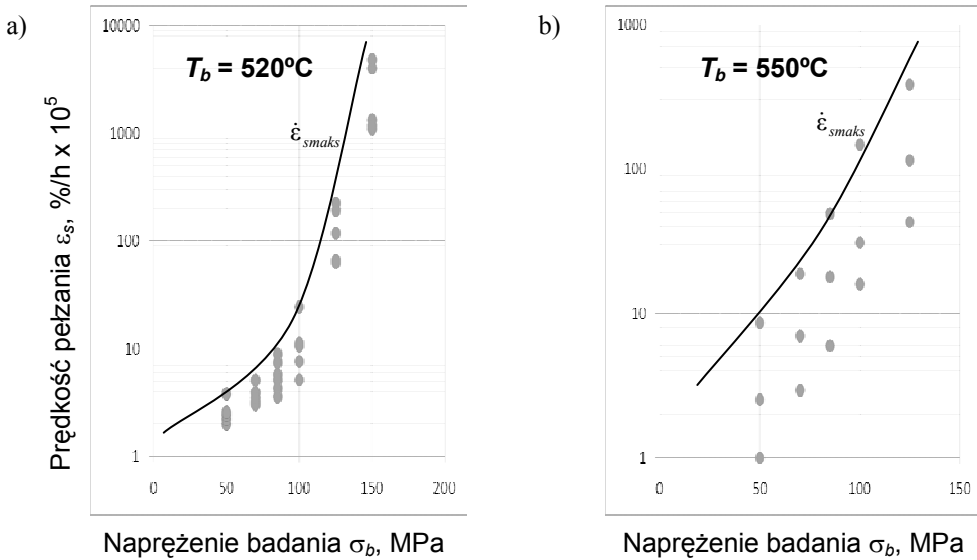
b)

$T_b = 550^\circ\text{C}$

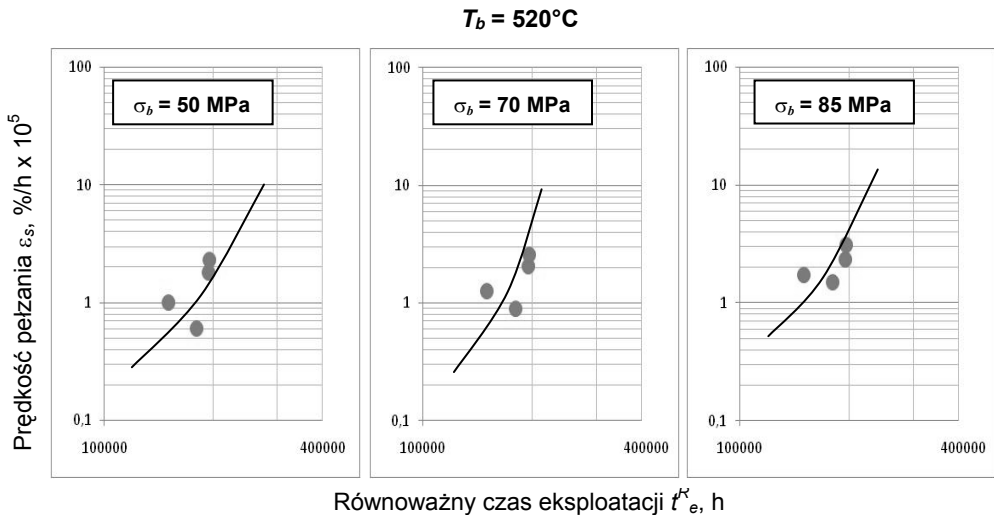


Rysunek 70. Prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w funkcji równoważnego czasu eksploatacji t_e^R przy stałym poziomie naprężenia σ materiałów elementów części ciśnieniowej kotła po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10 w temperaturze dalszej eksploatacji: a) 520°C , b) 550°C (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 540^\circ\text{C}$)

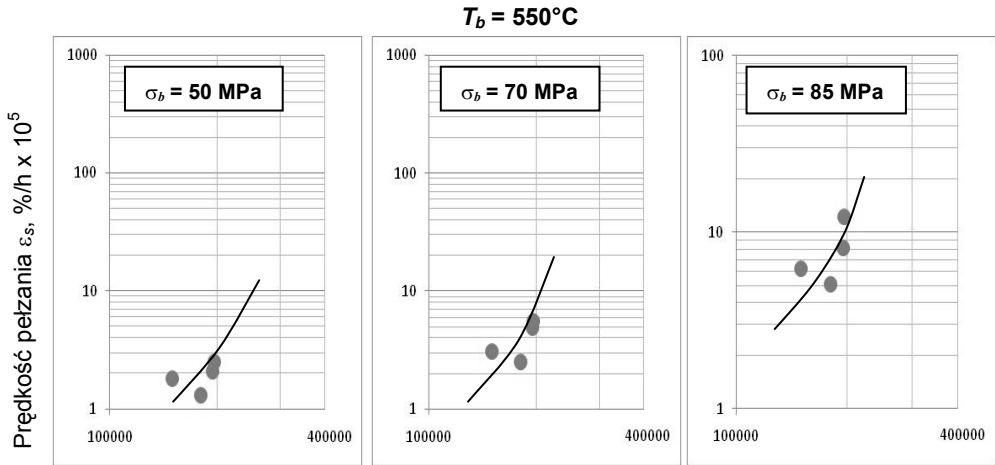
materiału po eksploatacji ok. 200 000 godzin wzrasta natomiast około dziesięciokrotnie w stosunku do materiału po ok. 100 000 godzin.



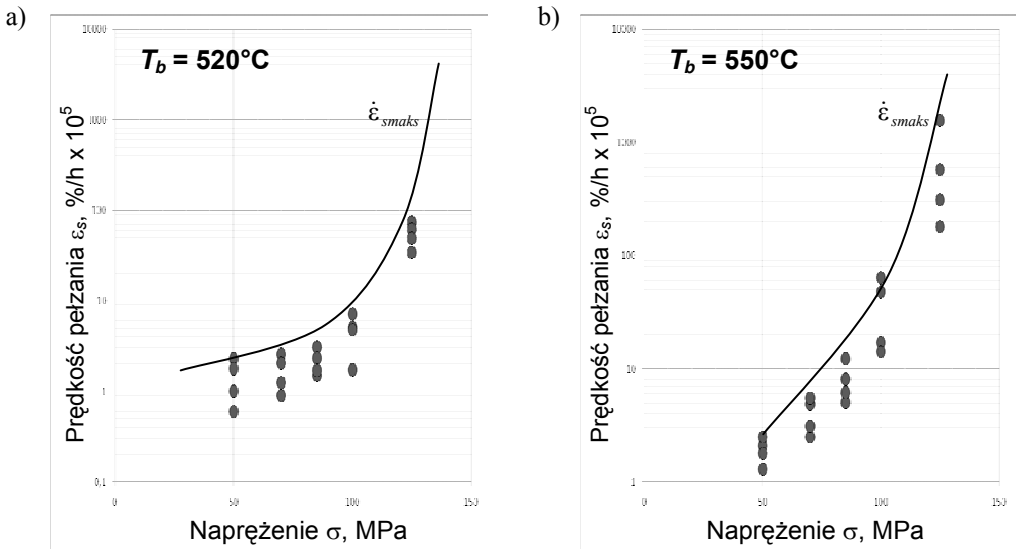
Rysunek 71. Maksymalna prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od naprężenia badania σ_b materiałów elementów części ciśnieniowej kotła po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy wykonanych z niskostopowej stali 10CrMo9-10 dla temperatury dalszej eksploatacji: a) 520°C , b) 550°C (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 540^{\circ}\text{C}$)



Rysunek 72a. Prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w funkcji równoważnego czasu eksploatacji t_e^R przy stałym poziomie naprężenia σ materiałów wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłowni energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy w temperaturze 520°C dalszej eksploatacji (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 540^{\circ}\text{C}$)



Rysunek 72b. Prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w funkcji równoważnego czasu eksploatacji t_e^R przy stałym poziomie naprężenia σ materiałów wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy w temperaturze 550°C dalszej eksploatacji (równoważna temperatura eksploatacji $T_e^R = 540^\circ\text{C}$)



Rysunek 73. Maksymalna prędkość pelzania w stanie stacjonarnym $\dot{\epsilon}_s$ w zależności od naprężenia σ materiałów wycinków głównych rurociągów pary świeżej kotłów energetycznych z niskostopowej stali 14MoV6-3 po eksploatacji poza obliczeniowy czas pracy dla temperatury dalszej eksploatacji: a) 520°C , b) 550°C