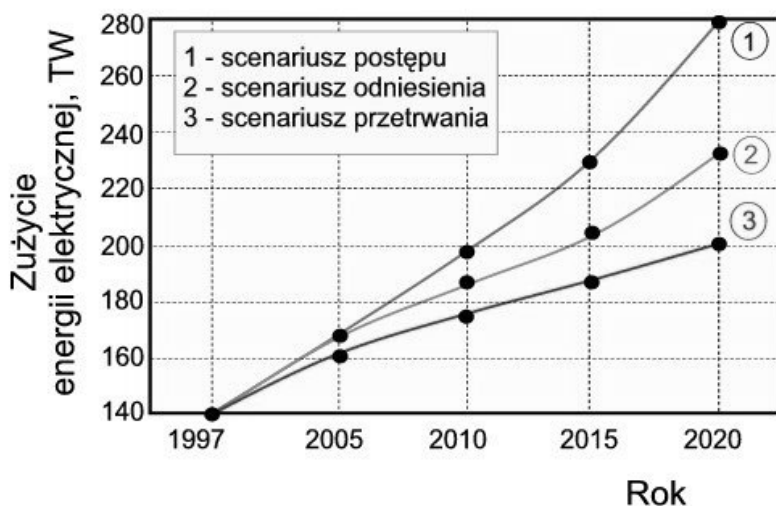


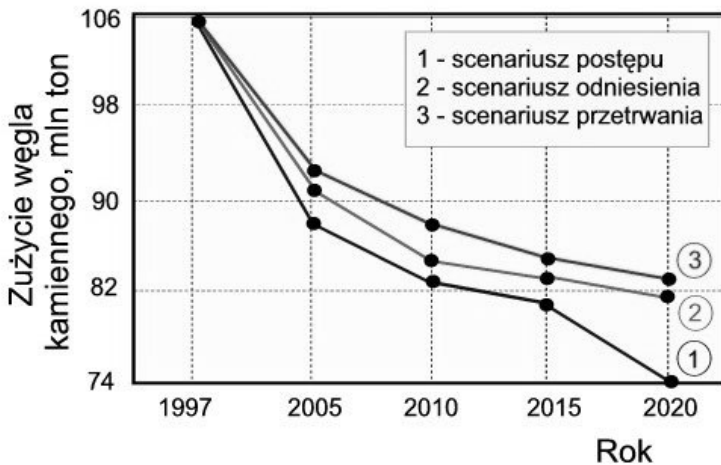
2. Ogólna charakterystyka długotrwałej eksploatacji elementów instalacji energetycznych

Zapotrzebowanie na energię elektryczną jest bezpośrednio związane z rozwojem gospodarczym kraju, produkcją przemysłową, energochłonnością oraz zarządzaniem energią. Przewidywano [436], że w Polsce do 2020 roku miało nastąpić prawie dwukrotne zwiększenie zużycia energii w porównaniu z rokiem 1997 (rys. 1), oraz że zmaleje zużycie węgla kamiennego w ogólnym bilansie surowców energetycznych z ok. 56% w 2007 do ok. 30% w 2020 roku (rys. 2). Uaktualnione dane [437] wskazują, że chociaż znaczenie węgla kamiennego w ogólnym bilansie surowców energetycznych rzeczywiście stale będzie maleć z obecnych 53% w roku 2010 do ok. 40% w 2020 roku i ok. 36% w 2030 roku, to jednak nadal będzie on podstawowym paliwem dla wielkich elektrowni i elektrociepłowni. Obecnie z węgla kamiennego i brunatnego wytwarza się około 92% energii elektrycznej w Polsce [437], choć pod koniec ubiegłego wieku przewidywano że będzie to nawet 97% [438].

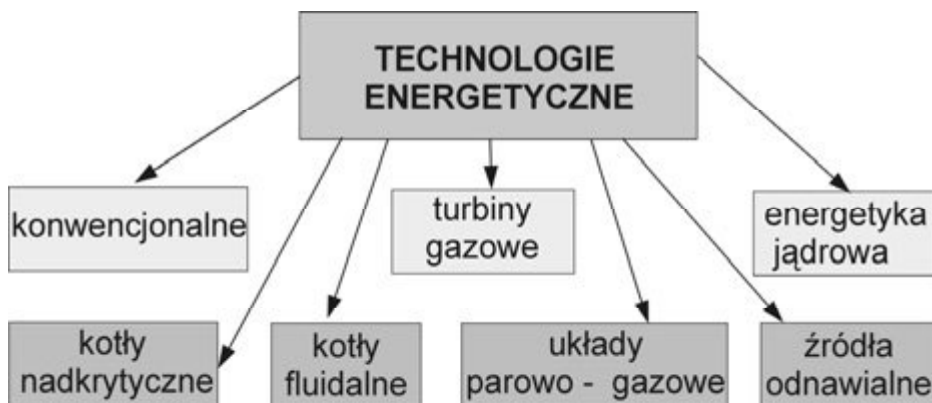
Rozwój technologii energetycznych (rys. 3) uzależniony jest m.in. od uwarunkowań techniczno-ekonomicznych, ekologicznych, prawnych, a nade wszystko od czynników materiałowo-technologicznych [438-444]. Wysokotemperaturowa wytrzymałość i trwałość elementów konstrukcyjnych, często określana jako żarowytrzymałość, zależy od wymaganej odporności na pełzanie, stabilności struktury materiału, technologiczności i rozwiązań



Rysunek 1. Prognozy zużycia energii elektrycznej do 2020 roku [436]



Rysunek 2. Prognozy zużycia węgla kamiennego [436]



Rysunek 3. Współczesne technologie energetyczne [50]

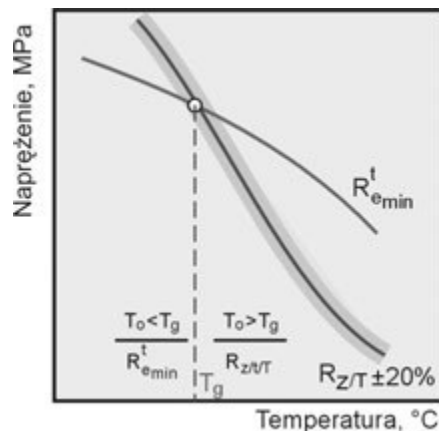
konstrukcyjnych, a także od poziomu zaawansowania technologii. W budowie maszyn i urządzeń energetycznych, podobnie jak w innych dziedzinach techniki, zastosowanie znajdują stale do pracy w podwyższonej temperaturze, w tym stale odporne na pękanie, a także coraz częściej inne żarowytrzymałe stopy metali. Żarowytrzymałość jest złożoną, wynikową cechą materiału, uwarunkowaną przebiegiem i wzajemnym oddziaływaniem procesów odkształcenia, umocnienia i dekohezji w podwyższonej temperaturze. Własności i cechy mechaniczne, fizykochemiczne oraz technologiczne stopów żarowytrzymałych zestawiono w tabelicy 3.

Tablica 3. Wymagania stawiane materiałom żarowytrzymałym stosowanym w energetyce cieplnej (opracowano według A. Maciejnego)

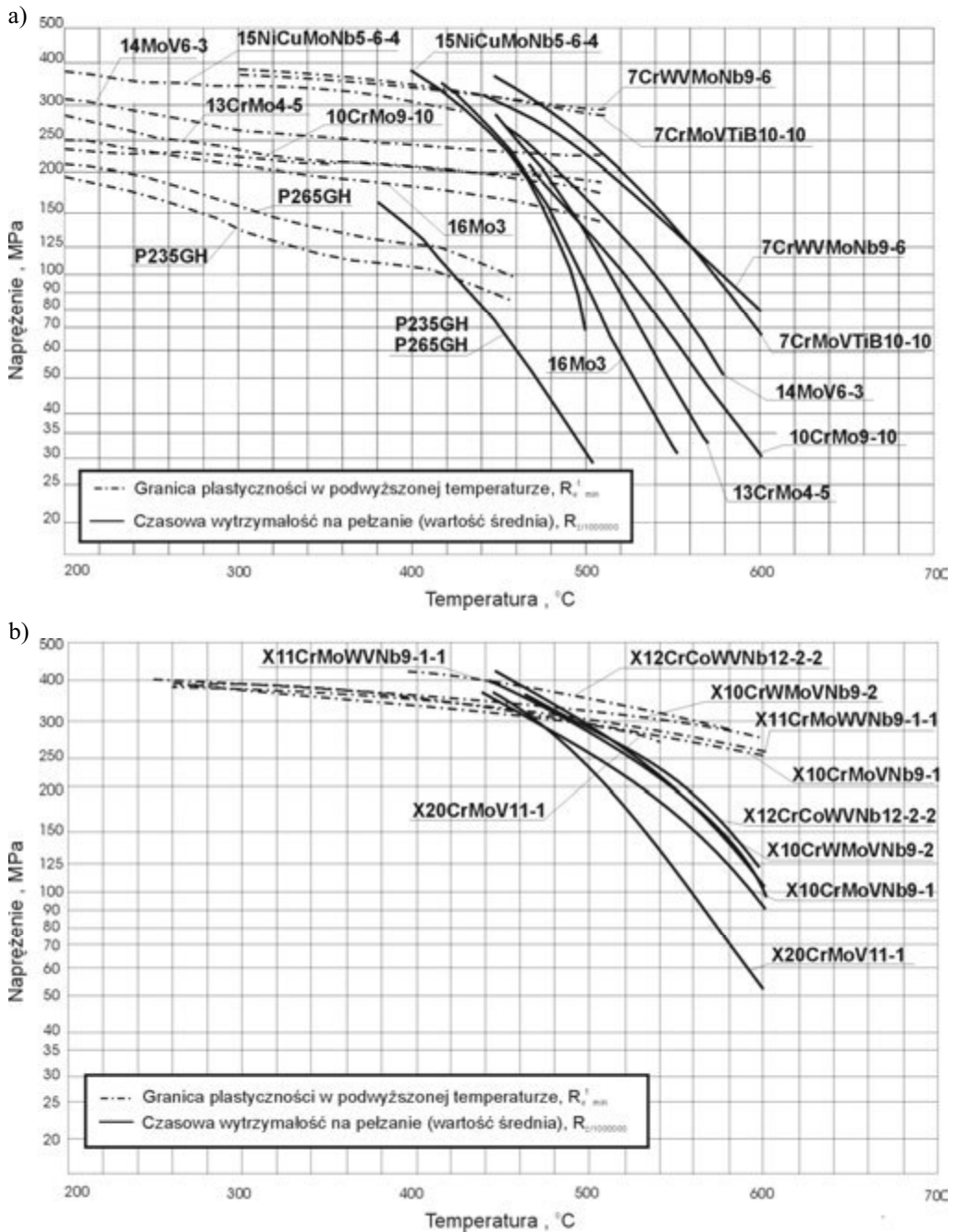
| Własności | | Wpływ ¹⁾ |
|--|---|---------------------|
| Własności mechaniczne | granica plastyczności w temperaturze podwyższonej | ↑ |
| | długotrwała wytrzymałość na pełzanie – czas do zniszczenia | ↑↑ |
| | wytrzymałość na obciążenia cykliczne – mechaniczne i cieplne | ↑ |
| | własności plastyczne – wydłużenie przy zniszczeniu, udarność | ↑↑ |
| | odporność na kruche pękanie | ↑ |
| | odporność na ścieranie i kawitację | – ~ |
| Własności fizyczne i chemiczne; odporność korozyjna | korozja równomierna – woda, para wodna, pary soli, spaliny, popiół paliwowy, nośniki energii jądrowej | ↑ |
| | korozja wżerowa | ~ |
| | korozja międzykrystaliczna | ~ |
| | korozja naprężeniowa | – ~ |
| | odporność na uszkodzenia radiacyjne | – |
| | stabilność wymiarowa | ↑ |
| | niemagnetyczność elementów rdzenia | – |
| Własności technologiczne | spawalność | ↑↑ |
| | podatność na obróbkę plastyczną na zimno i gorąco | ↑ |
| | obrabiwalność | ↑ |
| | jakość powierzchni gotowych produktów | ↑ |
| | jednorodność składu chemicznego | ↑ |
| ¹⁾ ↑↑ szczególnie istotny, ↑ istotny, ~ istotny w niektórych przypadkach, – nieistotny. | | |

Żarowytrzymałość zależy nie tylko od czynników technologicznych i konstrukcyjnych, lecz głównie od wzajemnej kombinacji temperatury, naprężenia i czasu eksploatacji, a także od środowiska, decydując o przebiegu zjawisk degradujących te własności, tzn.: pełzania, które jest podstawowym procesem determinującym mechaniczne zachowanie się metali i stopów w podwyższonej i wysokiej temperaturze, zmęczenia mechanicznego i zmęczenia cieplnego, które jest najbardziej złożonym z tych procesów, a ponadto coraz częściej korozji. Elementy konstrukcyjne urządzeń i instalacji energetycznych, ciepłowniczych oraz petrochemicznych ulegają zatem wskutek eksploatacji ciągłemu procesowi niszczenia, co wpływa na rzeczywistą trwałość elementu, przy czym w praktyce czas bezpiecznej i sprawnej pracy jest jedynym interesującym wskaźnikiem ilościowym, związanym bezpośrednio z trwałością, jako miarą ogólnie pojętego wyężenia materiału lub elementu konstrukcyjnego. Określenie trwałości wymaga wyznaczenia czasu granicznego do zniszczenia t_z (t_r), granicznej liczby cykli do zniszczenia N_z (N_r), liczby operacji lub zabiegów technologicznych oraz liczby innych wielkości mierzalnych, po których przy założonym kryterium nastąpi zniszczenie lub utrata

zdolności spełniania wymaganych funkcji przez materiał lub element konstrukcyjny. Elementy konstrukcyjne w wymienionych gałęziach przemysłu, zwłaszcza energetycznego, są eksploatowane w warunkach lokalnej kumulacji oddziaływania niejednorodnych i niestacjonarnych pól temperatury oraz obciążeń mechanicznych, środowiska, zmian i niejednorodności struktury materiału i związanych z tym zmian własności mechanicznych oraz przy okresowych losowych przeciążeniach, w wyniku czego są narażone na występowanie w nich lokalnie odkształceń plastycznych i różnego rodzaju uszkodzeń, zwykle w strefach spiętrzenia naprężeń wywołanych karami mechanicznymi, karami strukturalnymi oraz dużym gradientem temperatury. Materiały stosowane do budowy urządzeń energetycznych i petrochemicznych powinny się zatem odznaczać nie tylko wymaganą odpornością na odkształcenie plastyczne w podwyższonej temperaturze, lecz również wykazywać małą podatność na pękanie, w tym szczególnie na tworzenie kruchego złomu w warunkach współdziałania czynników mechanicznych, korozyjnych i aktywowanych cieplnie. Wśród elementów instalacji energetycznych można wyróżnić pracujące poniżej lub powyżej temperatury granicznej T_g , czyli w warunkach pełzania. Temperaturę graniczną T_g dla każdej stali stosowanej na elementy pracujące w podwyższonej temperaturze, wyznacza punkt przecięcia krzywej minimalnej granicy plastyczności R_{emin}^t ($R_{0,2min}^t$) i krzywej średniej czasowej wytrzymałości na pełzanie dla 100 000 godzin $R_{Z/100000T}$, a w rzeczywistości określanej jako zakres temperatury zależny od pasma rozrzutu $R_{0,2}$ i R_Z (rys. 4), o wartościach przykładowo zestawionych przez autora dla standardowych stali kotłowych oraz nowych gatunków stali żarowytrzymałych (rys. 5).



Rysunek 4. Schemat wyznaczania temperatury granicznej T_g [50]



Rysunek 5. Charakterystyki żarowytrzymałościowe stali kotłowych:
a) niestopowych i niskostopowych,
b) wysokochromowych 9-12% Cr

Szybkość odkształcenia w czasie pełzania najogólniej jest funkcją czterech parametrów:

$$\dot{\varepsilon} = \dot{\varepsilon}(\sigma, T, S_i, \omega), \quad (1)$$

gdzie:

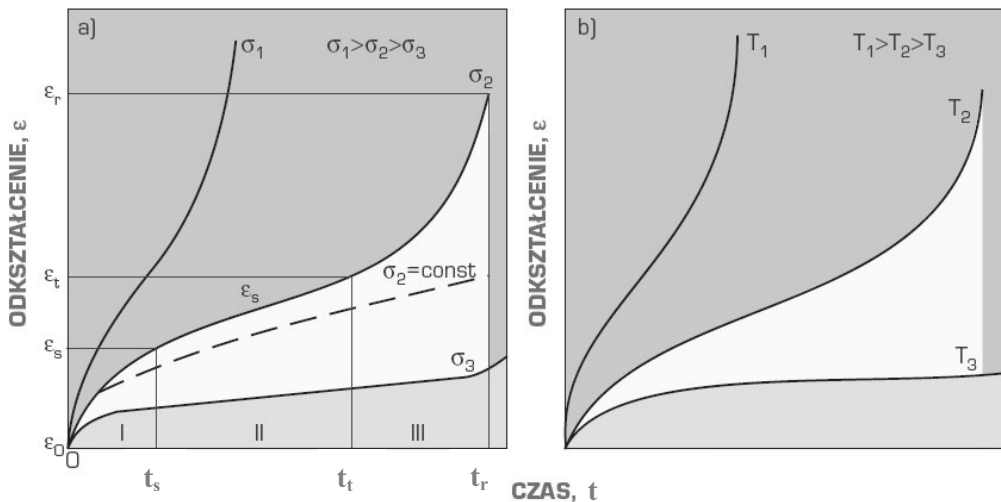
σ – przyłożone naprężenie,

T – temperatura,

$S_i = S_1, S_2, S_3 \dots S_n$ – parametry strukturalne określające cechy struktury wywierające wpływ na szybkość pełzania, a w szczególności: gęstość i układ dyslokacji, wielkość ziarna, stężenie pierwiastków stopowych rozpuszczonych w osnowie, rozkład i udział wydzieleni wewnątrz i na granicach ziarn,

ω – stan wewnętrznych uszkodzeń wywołujących pęknięcie.

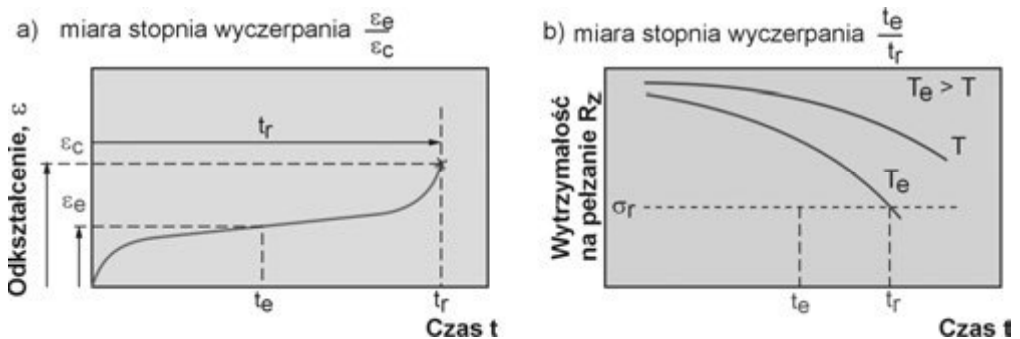
Zmiany stanu ustalonego, charakterystycznego dla II stadium pełzania, są wywoływane oddziaływaniem struktury na stałe obciążenie lub następują w przypadku, gdy \dot{S}_i i/lub $\dot{\omega}$ są różne od zera, gdzie \dot{S}_i – szybkość zmian parametrów strukturalnych, $\dot{\omega}$ – szybkość zmian stanu uszkodzeń wewnętrznych. Wówczas zwykle zwiększa się szybkość pełzania i rozpoczyna się III stadium pełzania (rys. 6), chociaż szybkość pełzania może ulec zmniejszeniu, jeżeli zmiany \dot{S}_i są spowodowane procesami wydzieleniowymi.



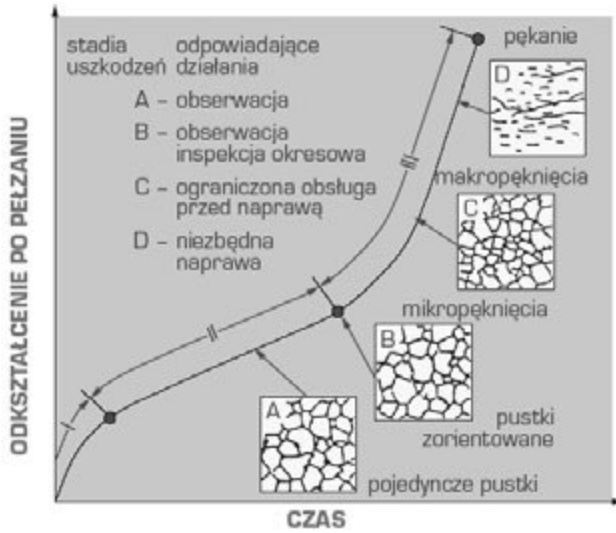
Rysunek 6. Krzywe pełzania a) w stałej temperaturze, b) przy stałym obciążeniu [49]

Można wyróżnić dwa rodzaje zmian w materiale prowadzące do zwiększenia szybkości pełzania. Pierwszym z nich jest wyczerpanie, gdy zmiany następują w strukturze $\dot{S}_i \neq 0$, a nie występuje proces dekohezji $\dot{\omega} = 0$. Wyczerpanie jest utratą zdolności materiału do odkształcenia plastycznego w wyniku przebiegu procesu pełzania. Stopień wyczerpania jest wartością względną i przy zerwaniu równy jest 1 lub 100%. Miarą stopnia wyczerpania jest stosunek odkształcenia ε elementu poddanego pełzaniu do całkowitego odkształcenia przy zerwaniu ε_c (rys. 7a). Miarą stopnia wyczerpania może być również stosunek czasu t przebiegu pełzania w danym elemencie do czasu zerwania t_r (rys. 7b). Zależność między wyczerpaniem odkształceniowym a czasowym ma charakter liniowy zwykle do końca II stadium pełzania [7, 101, 445, 446].

Drugim procesem jest uszkodzenie, gdy powstają i rozwijają się uszkodzenia wewnętrzne $\dot{\omega} \neq 0$, a nie towarzyszą im zmiany struktury $\dot{S}_i = 0$. Uszkodzenie w wyniku pełzania to nieodwracalne zmiany struktury, spowodowane przez oddziaływanie temperatury i naprężenia mechanicznego w długotrwałym czasie. Stopień uszkodzenia może być określony eksperymentalnie metodami metalograficznymi. Wyczerpywanie się materiału jest spowodowane między innymi przez powstawanie i rozwijanie się uszkodzeń wewnętrznych w metalu poddanym pełzaniu w przypadku, gdy $\dot{\omega} \neq 0$, a $\dot{S}_i = 0$. Zwykle oba wymienione procesy przebiegają równoległe, a jedynie jeden z nich jest dominującym w zależności od stadium pełzania i głównie decyduje o wyczerpaniu lub uszkodzeniu materiału. W zależności od stadium pełzania różny jest stopień wyczerpania materiału i różne nasilenie nieciągłości od pustek poprzez szczeliny do pęknięć spowodowanych przez pełzanie (rys. 8).

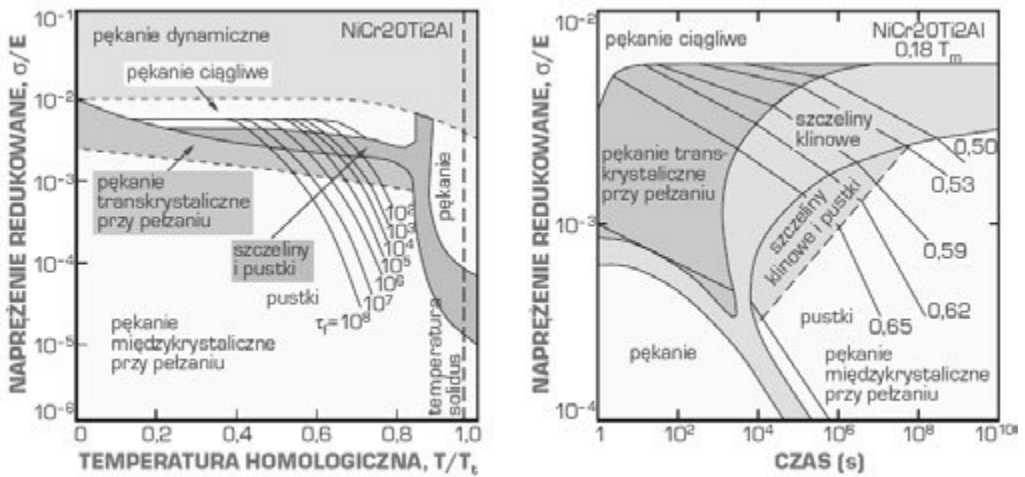


Rysunek 7. Graficzne ujęcie wyczerpania materiału, którego miarą jest:
a) stosunek odkształcenia $\varepsilon_e / \varepsilon_c$ lub b) stosunek czasu t_e / t_r [50]

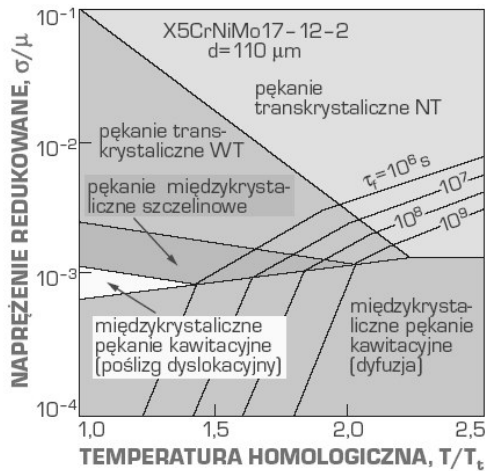


Rysunek 8. Krzywa pełzania z wynikami badań metalograficznych odpowiadających różnym klasom wewnętrznych uszkodzeń materiału podczas eksploatacji; opracowano według [447, 463]

W temperaturze homologicznej wyższej od 0,4 na krzywej pełzania obserwuje się trzecie stadium pełzania przyspieszonego kończące się pękaniem. Pęknięcie zależy od temperatury oraz szybkości pełzania, która jest funkcją czasu pełzania oraz przyłożonego naprężenia. Na podstawie analizy map mechanizmów pęknięcia w wyniku pełzania (rys. 9 i 10) w układach współrzędnych: naprężenie redukowane-temperatura homologiczna, naprężenie redukowane-czas do zerwania oraz średnica ziarna-naprężenie redukowane, można określić dominujące rodzaje i mechanizmy pęknięcia w wyniku pełzania. Pęknięcie zwykle jest międzykrystaliczne w przypadku niskich naprężeń i małych minimalnych szybkości pełzania, gdy wydłużenie jest bardzo małe, a przewężenie pomijalnie małe. Pęknięcie międzykrystaliczne przy pełzaniu może być szczelinowe i jest związane z powstawaniem szczelin klinowych na styku dwóch, trzech lub czterech ziarn, ich wzrostem wzdłuż granic ziarn oraz łączeniem się szczelin zainicjowanych na różnych nieprzylegających do siebie stykach ziarn. Pęknięcie międzykrystaliczne kawitacyjne następuje w wyniku powstawania pustek na granicach ziarn usytuowanych pod kątem zbliżonym do 45 lub 90° do osi przyłożonego naprężenia, ich wzrostu oraz koalescencji, co decyduje o utworzeniu szczelin. W przypadku dużych naprężeń i dużych minimalnych szybkości pełzania występuje pęknięcie transkrystaliczne, czemu towarzyszy znaczne wydłużenie i przewężenie. Pęknięcie transkrystaliczne przy pełzaniu polega na inicjacji pęknięć w osnowie na granicach międzyfazowych z wtrąceniami oraz następnej ich propagacji,



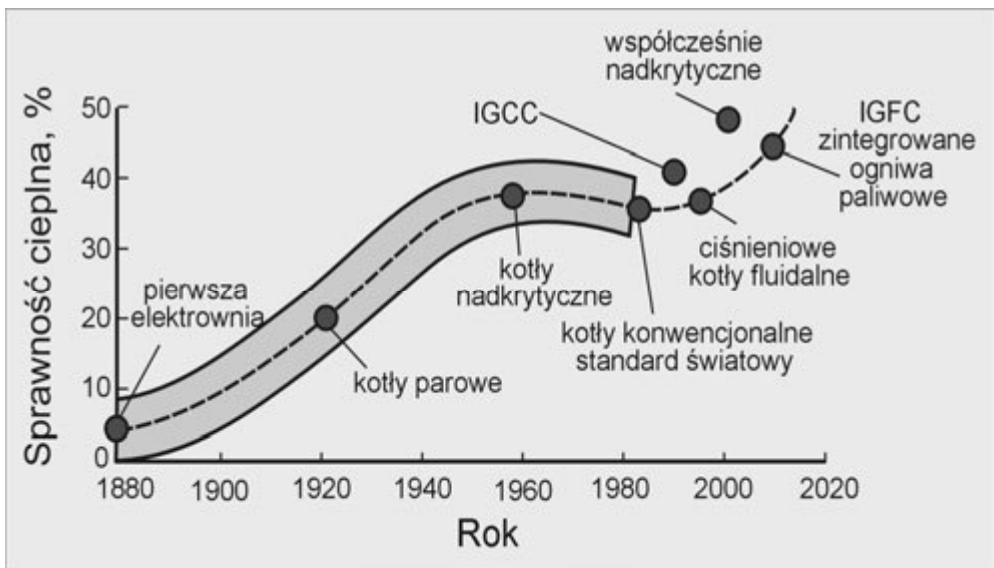
Rysunek 9. Mapy mechanizmów pęknięcia stopu NiCr20Ti2Al; opracowano według M.F. Ashby’ego [49]



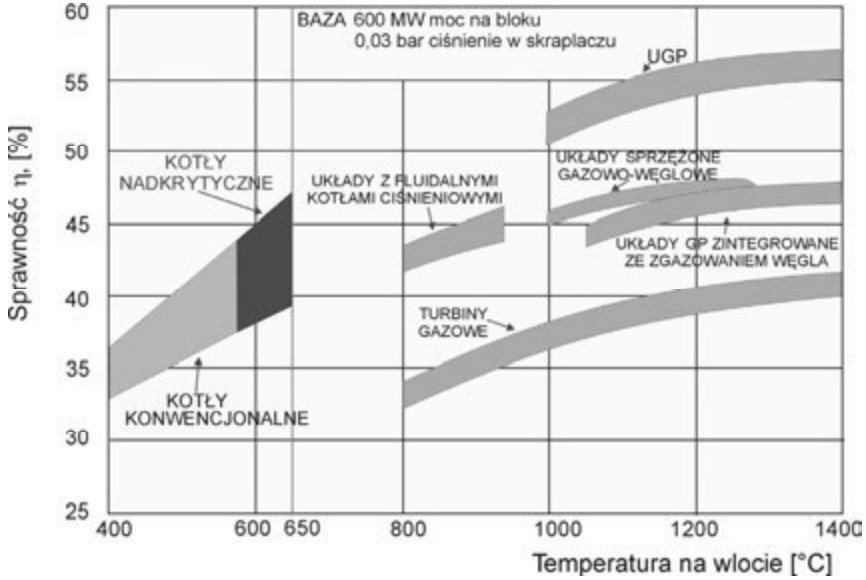
Rysunek 10. Mapa mechanizmów pęknięcia stali austenitycznej; opracowano według M.F. Ashby’ego [49]

prowadzących do utraty stabilności plastycznej i zrywania oddzielających te wtrącenia mostków nieuszkodzonego wewnątrz materiału. Wraz ze wzrostem odkształcenia następuje koncentracja naprężeń na wtrąceniach, co powoduje pęknięcie wtrąceń lub naruszenie kohezji między nimi a osnową. Koalescencja pęknięć wpływa na pęknięcie przy niewielkim zwiększeniu wydłużenia.

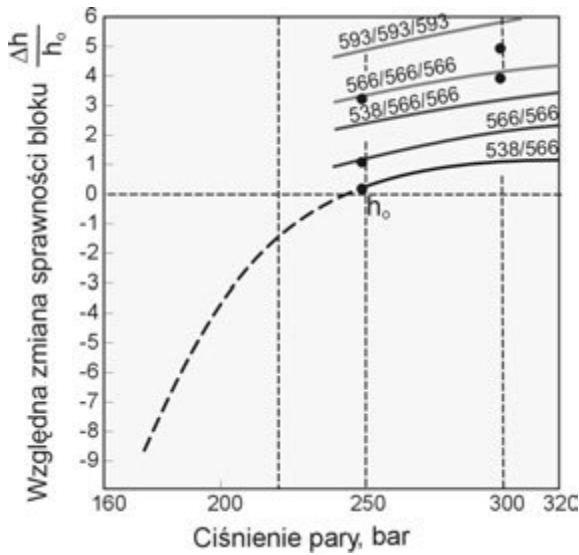
Podstawowym wskaźnikiem określającym nowoczesność jednostki energetycznej bądź danej technologii jest jej sprawność (rys. 11-13). Sprawność netto najlepszych polskich elektrowni wynosi średnio 33%, gdy w świecie wynosi średnio 36%, a w nowo budowanych blokach sięga nawet 42-46%. Wzrost sprawności bloków, z wyjątkiem układów dwuczynnikowych i kombinowanych, można osiągnąć stosując wysokie nadkrytyczne (tj. powyżej temperatury 540°C i ciśnienia 18 MPa) parametry pary. W ostatnich kilkunastu latach w Europie, USA i Japonii obserwuje się wzrost zainteresowań blokami o parametrach nadkrytycznych, jak również intensywne prace projektowe i inwestycyjne bloków o mocy 400-1000 MW z turbinami na parę podwójnie przegrzaną o ciśnieniu 25-30 MPa i temperaturze 580-610°C (rys. 11). Realizowane programy badawcze dotyczą jeszcze wyższych parametrów roboczych, których ciśnienie wynosi powyżej 30 MPa, a temperatura w zakresie 620-650°C, a nawet 700°C [442, 448-455]. Przejście do parametrów nadkrytycznych umożliwiło budowę klasycznych bloków kondensacyjnych o sprawności nawet do 48% netto (z uwzględnieniem systemów oczyszczania spalin) przy znacznym ograniczeniu emisji szkodliwych zanieczyszczeń i obniżeniu kosztów wytwarzania energii elektrycznej.



Rysunek 11. Rozwój technologii wytwarzania energii elektrycznej opartej na spalaniu węgla [444]



Rysunek 12. Porównanie sprawności różnych technologii energetycznych [441]



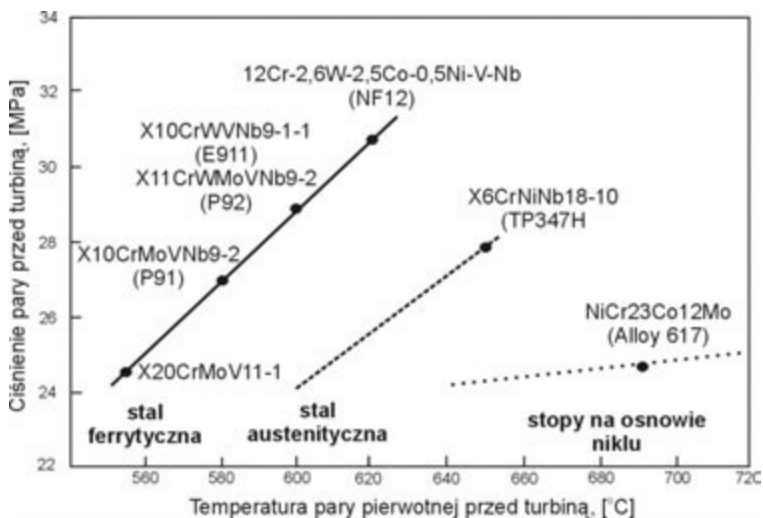
Rysunek 13. Względna zmiana sprawności bloku energetycznego w zależności od parametrów temperaturowych pary przegrzanej [50]

Znaczne podwyższenie temperatury i ciśnienia pracy urządzeń energetycznych jest możliwe dzięki rozwojowi inżynierii materiałowej, zapewniającej wytwarzanie elementów

konstrukcyjnych z nowych stali i stopów niklu odpornych na pełzanie o podwyższonych własnościach użytkowych. Zagadnienie to wpisuje się w kluczowy zakres badawczo-rozwojowy technologii procesów materiałowych i nowych materiałów, objęty wynikami badań wykonanych w ramach Foresightu technologicznego Europy w 5. i 6. Programach Ramowych Wspólnoty Europejskiej i ogłoszonymi w raportach z realizacji projektów „The Future of Manufacturing in Europe” [456] oraz „Manufacturing Visions The Futures Project” [457]. Podstawową zmianą metodologii projektowania materiałowego, wynikającą z wymienionych ustaleń tych badań foresightowych, jest wytwarzanie materiałów spełniających potrzeby wytwórców produktów rynkowych w odpowiednim czasie i miejscu, o własnościach zamówionych przez użytkowników produktów i o odpowiednio ukształtowanej strukturze gwarantującej wymagany zespół własności fizykochemicznych. Nowe materiały inżynierskie i procesy ich wytwarzania są podporządkowane potrzebom klienta i funkcjom użytkowym produktów oraz założonym zachowaniom tych materiałów podczas eksploatacji. Materiały współcześnie stosowane na elementy kotłów o parametrach nadkrytycznych zestawiono w tablicy 4.

Tablica 4. Zestawienie materiałów stosowanych na elementy krytyczne kotłów o parametrach nadkrytycznych; opracowano według [460]

| Element kotła | Materiał (oznaczenia według: ¹ ASME, ² Sumitomo Japan) | Temperatura, °C, odpowiadająca $R_{z/100000/600^{\circ}\text{C}} = 100 \text{ MPa}$ |
|--|--|---|
| Ściany membranowe (temperatura ścianki rur parownika ok. 420-455°C) | 13CrMo4-5 | 515 |
| | 7CrMoVTiB10-10 (T24 ¹) | 550 |
| | 7CrWVMoNb9-6 (T23 ¹ ; HCM2S ²) | 580 |
| | 0,1C-12Cr-1Mo-1W-V-Nb (HCM12 ²) | 600 |
| Rury przegrzewacza (temperatura ścianki rur ok. 640-670°C) | X3CrNiMoN1713 | 630 |
| | X10CrNiMoMnNbVB15-10-1 (Esshete 1250) | 640 |
| | X6CrNiNb18-10 (TP347HFG ¹) | 655 |
| | NiCr23Co12Mo (Alloy 617 ¹) | 690 |
| | NiCr23MoCo1Nb3 (Alloy 625 ¹) | 740 |
| Komory zbiorcze i kolektory | X10CrMoVNb9-1 (P91 ¹) | 590 |
| | X10CrWMoVNb9-2 (P92 ¹) | 615 |
| | X11CrMoWVNb9-1-1(E911 ¹) | 615 |
| | 12Cr-2,6W-2,5Co-0,5Ni-V-Nb (NF 12 ²) | 645 |
| | X6CrNiNb18-10 (TP347HFG) | 655 |
| | NiCr23Co12Mo (Alloy 617 ¹) zmodyfik. | 700 |
| Wodooddzielacze | X10CrMoVNb9-1 (P91 ¹) | 590 |



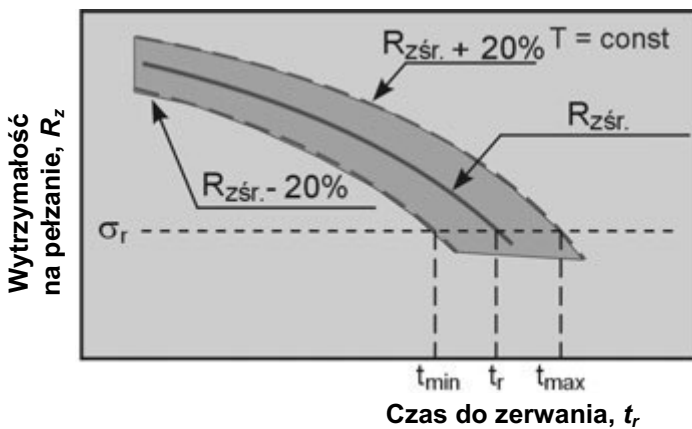
Rysunek 14. Dobór optymalnych parametrów czynnika roboczego (p_r , T_r) dla stosowanych materiałów na komory wylotowe o geometrii $D_z/D_w = 1,8$; opracowano według [460]

Standardowe stale odporne na pełzanie o osnowie ferrytycznej, nisko- i wysokostopowe, znajdują zastosowanie w temperaturze do 540°C. Spośród tych stali jedynie z gatunku 13CrMo 4-5 wykonano rury dla górnej części komory paleniskowej kotła w duńskiej elektrowni NORD J oddanej do użytku w 1998 roku [457]. Ponadto na ściany komory paleniskowej przewidziano zastosowanie nowych stali niskostopowych 7CrWVMoNb9-6 (T23) oraz 7CrMoVTiB10-10 (T24). Na pozostałe elementy krytyczne stosowane będą nowe wysokostopowe stale martenzytyczne i austenityczne oraz stopy niklu [449, 453, 458-460]. Stal SA213 - TP347 H o drobnoziarnistej strukturze austenitycznej spełnia wymagania wytrzymałości na pełzanie, odporności na utlenianie po stronie pary oraz odporności na korozję wysokotemperaturową po stronie spalin. Zakres stosowalności materiałów na komory wylotowe przegrzewacza pary pierwotnej o stosunku geometrii $D_z/D_w = 1,8$ (przy standardowym 1,5) i obliczeniowym współczynniku wytrzymałościowym (współczynniku osłabienia) $Z = 0,8$ przedstawiono na rysunku 14, pokazując optymalne parametry czynnika roboczego dla danego materiału komory, który przy takim samym obciążeniu zapewnia najniższe jednostkowe zużycie ciepła.

Elementy konstrukcyjne pracujące powyżej temperatury granicznej T_g (rys. 4) projektuje się odpowiednio do obciążeń roboczych, na ograniczony obliczeniowy czas pracy t_o ,

przyjmowany do obliczeń wcześniej jako 100 000, a obecnie 100 000, 200 000 lub nawet 250 000 h i nazywany trwałością obliczeniową (lub projektową). Praktyczne znaczenie ma trwałość rozporządzalna odpowiadająca czasowi, w którym element konstrukcyjny może być bezpiecznie eksploatowany w założonych warunkach temperatury i obciążenia, ograniczona krytycznym stopniem wyczerpania lub uszkodzenia materiału. Trwałość rzeczywista odpowiada natomiast czasowi do zerwania materiału poddanego pełzaniu. Trwałość elementu konstrukcyjnego oraz trwałość zbadana laboratoryjnie na próbkach poddanych jednoosiowej próbie pełzania nie są identyczne. Na podstawie wyników tej próby można wnioskować o trwałości elementów konstrukcyjnych, chociaż z dużym stopniem niepewności, jedynie w razie znajomości warunków eksploatacji, w tym temperatury oraz rozkładu naprężeń w elemencie konstrukcyjnym i ich zmian podczas eksploatacji.

Obliczeniowa trwałość rozporządzalna w praktyce jest zwykle wielokrotnie mniejsza od rzeczywistej rozporządzalnej trwałości elementów konstrukcyjnych, ze względu na brak dokładnych danych dotyczących rzeczywistych warunków eksploatacji oraz zróżnicowaną strukturę i własności materiału w stanie wyjściowym, a także z powodu rozrzutu czasowej wytrzymałości na pełzanie w pasmach w zależności od nachylenia krzywych, co wpływa na zróżnicowanie określenia trwałości o 10 do 20 razy (rys. 15) [461] oraz przyjmowanie w obliczeniach konstrukcyjnych najbardziej niekorzystnych warunków pracy, np. niestacjonarnego obciążenia (rys. 16a) oraz zmian temperatury eksploatacji, przy stałym naprężeniu roboczym (rys. 16b) i współczynników bezpieczeństwa, a także dobór większych

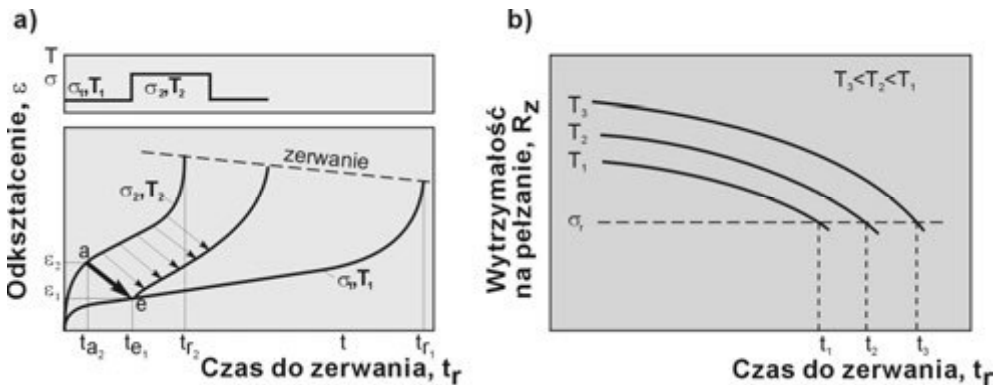


Rysunek 15. Pasma rozrzutu czasowej wytrzymałości na pełzanie, gdzie σ_r – naprężenie eksploatacyjne, t_r – czas do zerwania [50]

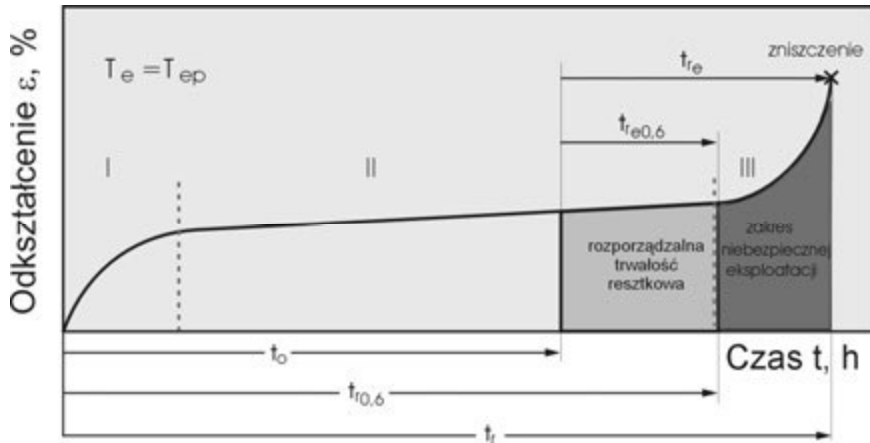
od obliczonych grubości ścian elementów i niejednorodne obciążenie w różnych miejscach instalacji.

Konieczne jest jednak określenie praktycznej trwałości rozporządzalnej oraz czasu bezpiecznej eksploatacji urządzeń i ich elementów po zakończeniu eksploatacji w czasie wynikającym z obliczeniowej trwałości rozporządzalnej, między innymi ze względu na bardzo wysokie koszty inwestycyjne instalacji energetycznych i ich bardzo długi okres amortyzacji. W odróżnieniu od trwałości rzeczywistej (do zniszczenia) t_r , znaczenie praktyczne ma trwałość rozporządzalna $t_{r,0,6}$ odpowiadająca czasowi, w którym element konstrukcyjny może być bezpiecznie eksploatowany w założonych warunkach temperatury i obciążenia [15, 49, 101, 462-464]. Różnica czasu między praktyczną i obliczeniową trwałością nazywana jest trwałością resztkową (rys. 17) [50, 101]. Jej wyznaczenie zawsze ma związek z przedłużaniem czasu bezpiecznej eksploatacji elementów instalacji energetycznej powyżej czasu obliczeniowego, założonego w obliczeniach konstrukcyjnych, co ma zasadnicze znaczenie ekonomiczne [15, 101, 462-464].

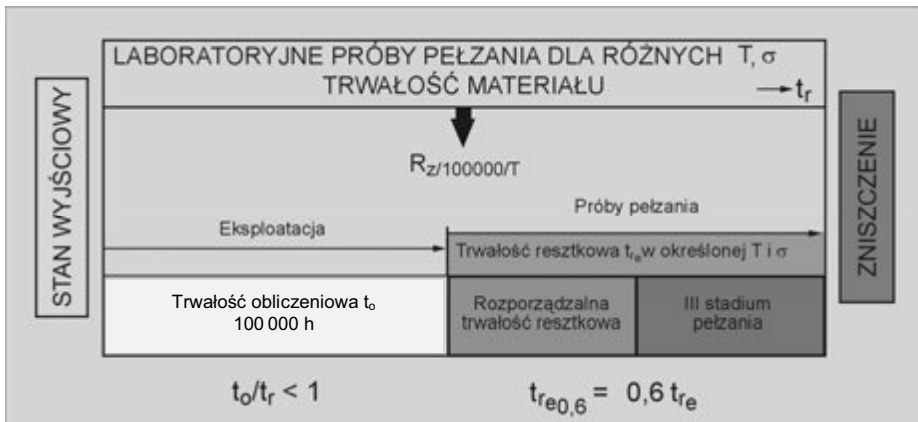
Ponieważ wyznaczenie trwałości resztkowej nie jest wystarczającą informacją do określenia czasu bezpiecznej eksploatacji, wprowadzono pojęcie rozporządzalnej trwałości $t_{r,0,6}$ oraz rozporządzalnej trwałości resztkowej $t_{r,0,6}$ (rys. 18). Rozporządzalna trwałość $t_{r,0,6}$ jest częścią trwałości, a jej wartość określa czas odpowiadający końcowi II stadium pełzania materiału będącego w eksploatacji. Wartość ta (ok. 0,6 t_r) ograniczona jest krytycznym stopniem wyczerpania lub uszkodzenia materiału identyfikowanym z III stadium pełzania. Podobne relacje występują pomiędzy rozporządzalną trwałością resztkową a trwałością resztkową.



Rysunek 16. a) Zmiana charakterystyki pełzania przy obciążeniu niestacjonarnym, b) wpływ temperatury pełzania na czas do zniszczenia przy założonym naprężeniu eksploatacyjnym [50]



Rysunek 17. Schematyczne ujęcie definicji trwałości resztkowej i rozporządzalnej [50]



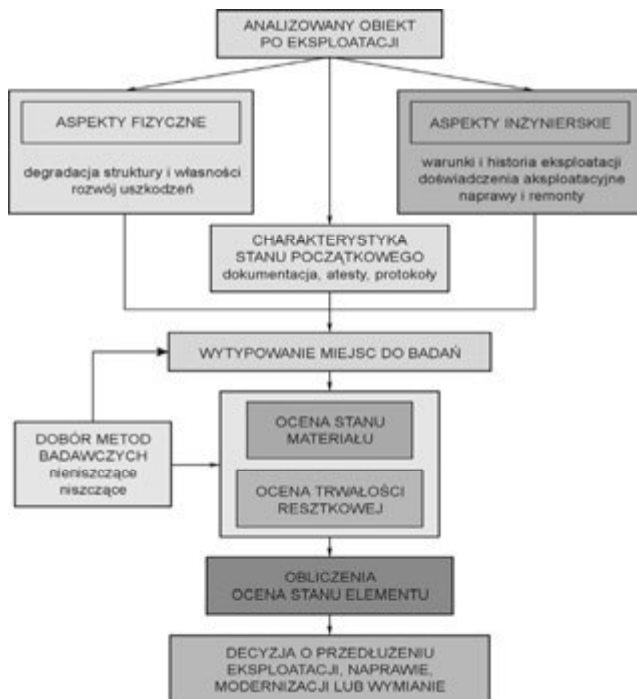
Rysunek 18. Graficzne ujęcie pojęcia „trwałość resztkowa i rozporządzalna” [50]

Wyniki badań autora potwierdzają poprawność założenia w metodzie obliczeniowej, że czas specjalnego nadzoru rozpoczyna się po osiągnięciu około 60% wyczerpania materiału [101, 464]. Przesłanki literaturowe i wyniki badań własnych dowodzą ponadto, że około 60% trwałości resztkowej odpowiada również granicznej wartości wydłużenia wynoszącej 1% lub 2%, powyżej której konieczny jest specjalny nadzór nad dalszą pracą elementu.

Trwałość resztkowa od wielu lat jest przedmiotem zainteresowania naukowego [1-101] i aplikacyjnego [102-435] autora niniejszej monografii, który jest równocześnie autorem lub współautorem wielu wyżej zdefiniowanych pojęć oraz autorem oryginalnej metodologii oceny trwałości resztkowej elementów instalacji energetycznych, zaprezentowanej w sposób

syntetyczny w dalszej części niniejszej pracy i wielokrotnie zweryfikowanej w praktyce. Opis własnych osiągnięć w tym zakresie stanowi ważny fragment niniejszej monografii. Stosowane dotychczas metody prognozowania trwałości resztkowej mogą wiązać się z rejestracją i kontrolą parametrów ruchowych w celu dokonania obliczeń przy wykorzystaniu reguły ułamków trwałości Robinsona [462, 463] i standardowych danych materiałowych lub z badaniami i próbami materiałów po eksploatacji wymagających bezpośredniego dostępu do elementów w celu pobrania próbek i dokonania pomiarów. W praktyce zwykle wykorzystywane są łącznie synergiczne możliwości obydwu grup metod. Złożoność problemu wymaga każdorazowo indywidualnego doboru zespołu metod, i to między innymi w zależności od historii eksploatacyjnej oraz stanu wyczerpania i uszkodzenia materiału. Brak jest nie tylko nieniszczącej, lecz również i niszczącej, jednej uniwersalnej, jednoznacznej metody oceny trwałości resztkowej materiału i elementu.

Obiektywnej oceny trwałości resztkowej materiału dokonać można opierając się jedynie na zespole metod i technik badawczych [15, 50, 101, 447, 463-471], łącznie wykorzystując wiedzę teoretyczną i praktyczną (rys. 19). O wynikach oceny trwałości elementu lub instalacji



Rysunek 19. Uogólniony sposób postępowania w ocenie stanu materiału i elementu [50]

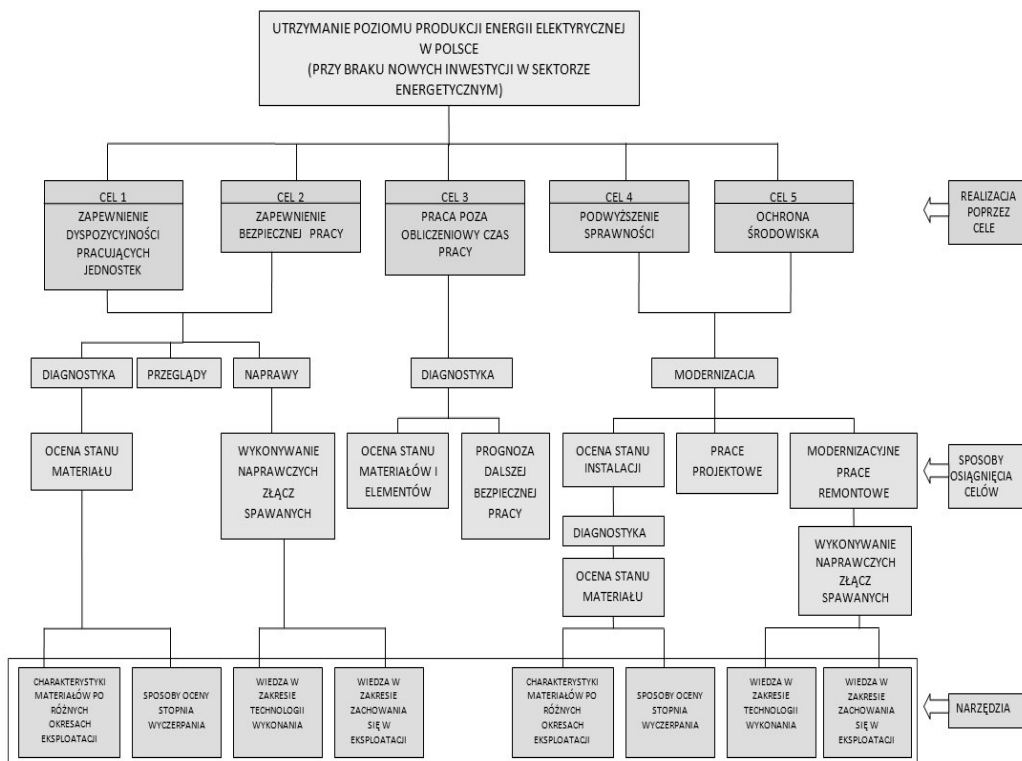
decyduje wybór elementów i miejsc do badań. Zwykle są to kolana, kształtki, obszary przyotworowe, spoiny obwodowe – w rurociągach, denka, obszary w rejonie otworów węzownic, mostki w okolicy króćców, spoiny – w komorach i kolektorach kotła oraz wałach wirników, kołach roboczych, kadłubach i tarczach kierowniczych turbiny. Wybór elementów i miejsc do badań ma niebagatelne znaczenie, bowiem decyduje o metodach i czasochłonności badań, trafności decyzji i ekonomiczności przedsięwzięć [15, 50, 101, 445, 464, 469-471]. Na ogół są to elementy i miejsca najbardziej wyęteżone, które wskazać można, mając dostateczną wiedzę z zakresu zagadnień konstrukcyjnych i technologicznych, popartą doświadczeniem eksploatacyjnym, a najpewniej z wykorzystaniem nowoczesnych technik numerycznych, w tym metody elementów skończonych [102, 105, 539, 540].

W ocenie elementów konstrukcyjnych, pracujących w warunkach pełzania niezbędną jest ocena stanu ich materiału. Przeprowadza się ją na podstawie nieniszczących lub niszczących badań materiałowych, dla których dokonuje się wyboru zespołu metod badawczych w zależności od dostępności do elementu i możliwości pobrania materiału do badań niszczących. Uzyskane wyniki odnosi się do posiadanych charakterystyk materiałów po eksploatacji. Zastosowanie takiego sposobu postępowania umożliwia dobre oszacowanie stanu materiału, stopnia jego wyczerpania oraz wyznaczenie czasu dalszej bezpiecznej eksploatacji do następnego przeglądu [15, 49, 50, 445, 463-471]. Jednak osiągnięcie 200 000 godzin eksploatacji materiału elementów wymaga w licznych przypadkach nie tylko dobrego oszacowania trwałości resztkowej ale i jej wyznaczenia na podstawie badań niszczących na pobranym reprezentatywnym wycinku do badań. Nie zawsze jest to jednak możliwe do wykonania w praktyce. Możliwe jest to do przeprowadzenia dla oceny stanu materiału nitki głównego rurociągu parowego lub rurociągu przerzutowego, jak również dla niektórych komór, schładzaczy i węzownic przegrzewaczy pary. Musi być to jednak poprzedzone rachunkiem ekonomicznym opłacalności przeprowadzenia takiej procedury.

Ocena stanu materiałów będących w eksploatacji wymaga opracowania i doboru nieniszczących i niszczących metod badań, dobieranych każdorazowo w zależności od charakteru pracy elementu i dostępności do badań. Ocena uzyskiwanych wyników badań zastosowanymi metodami wymaga jednak znajomości zmian struktury, a w tym rozwoju procesów wydzielania węglików i w ich wyniku obniżania się własności mechanicznych, szczególnie odporności na pełzanie, decydujących o zdolności do przenoszenia wymaganych obciążeń eksploatacyjnych badanych materiałów pracujących powyżej temperatury granicznej,

a także mechanizmów uszkodzenia w wyniku długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania. Ocenę taką umożliwiającą charakterystyki materiałów po różnych okresach eksploatacji wraz z systemem oceny ich stanu i sposobem wyznaczania lub oszacowania czasu dalszej eksploatacji, najczęściej znacznie poza czas obliczeniowy (rys. 20).

Wśród metod oceny trwałości resztkowej wyróżnia się metody polegające na gromadzeniu i kontroli parametrów ruchowych instalacji energetycznej w celu dokonania obliczeń przy wykorzystaniu standardowych danych materiałowych i reguły ułamków trwałości [49, 50, 447, 461, 466]. Metody obliczeniowe, szczegółowo opisane w pracy własnej [50], chętnie są stosowane przez eksploatorów urządzeń energetycznych, szczególnie w krajach, które nie dysponują pełnym zakresem informacji dotyczących zachowania się materiałów stosowanych na urządzenia energetyczne po długich okresach eksploatacji. Metody polegające na badaniach i próbach materiałów po eksploatacji wymagają bezpośredniego dostępu do elementu



Rysunek 20. Cele, sposoby i narzędzia stosowane dla utrzymania poziomu produkcji energii elektrycznej w Polsce

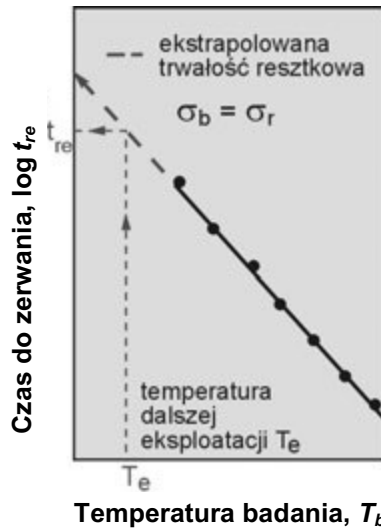
w celu dokonania pomiarów i pobrania próbki. Ubytki powstałe w wyniku pobrania próbek materiału są naprawiane przez spawanie, a w przypadkach próbek zminiaturyzowanych jedynie przez wyrównanie powierzchni. Badania materiału po eksploatacji umożliwiają dokładną ocenę stopnia jego wyczerpania i stopnia uszkodzenia, nie wymagają natomiast znajomości historii warunków pracy, w tym naprężenia i temperatury oraz standardowych danych materiałowych. Metody te mogą być zarówno niszczące, jak i nieniszczące, w tym bezpośrednio na zainstalowanych elementach urządzeń energetycznych. Najbardziej wiarygodne wyniki przy prognozowaniu trwałości resztkowej uzyskuje się dysponując wynikami prób pełzania materiału po eksploatacji oraz w stanie wyjściowym. Przy ustalaniu przedłużonego czasu eksploatacji przyjmuje się najkrótszy czas wynikający z czasowej wytrzymałości na pełzanie materiału po eksploatacji, maksymalnej prędkości pełzania w warunkach eksploatacji i rezerwy odkształcenia wynikającej z zależności:

$$t_{ep} = \frac{(\varepsilon_{dop} - \varepsilon_e)}{\dot{\varepsilon}_{ep}}, \quad (2)$$

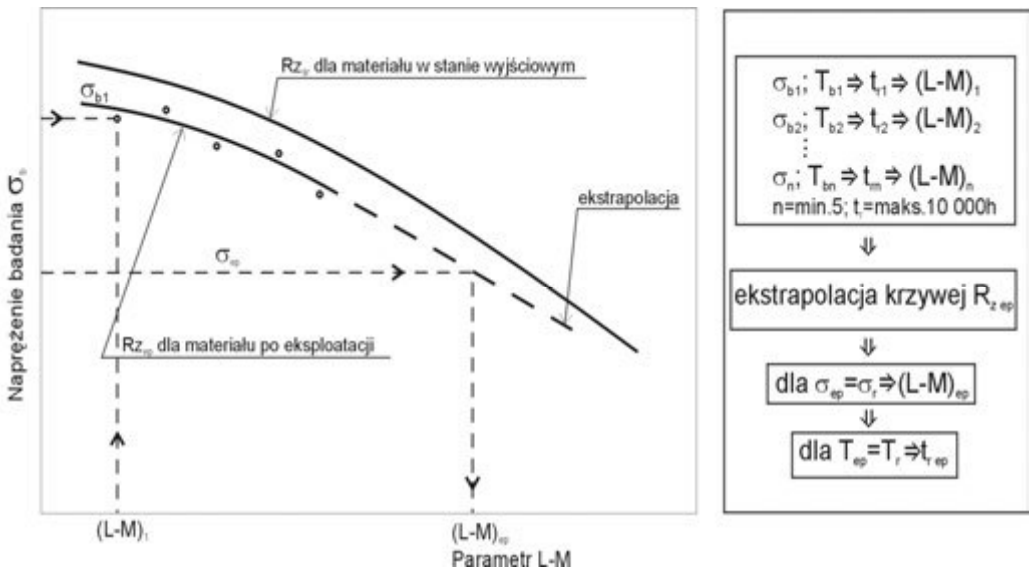
gdzie:

- t_{ep} – czas przedłużonej eksploatacji,
- ε_{dop} – odkształcenie dopuszczalne,
- ε_e – rzeczywiste odkształcenie po eksploatacji,
- $\dot{\varepsilon}_{ep}$ – rzeczywista prędkość pełzania dla σ_r i T_e ,
- σ_r – naprężenie robocze,
- T_e – temperatura eksploatacji.

Najczęściej stosowane są przyspieszone próby pełzania, często też nazywane skróconymi próbami pełzania [54, 59], realizowane zwykle przy naprężeniu badania σ_b odpowiadającym roboczemu σ_r oraz w temperaturze badania T_b wyższej od temperatury eksploatacji T_e , których wyniki są ekstrapolowane do temperatury eksploatacji T_e (rys. 21). Warunki tych prób są tak dobrane aby ich czas do zerwania nie wynosił więcej niż 10 000 godzin. Po wykonanej ekstrapolacji (rys. 22) wyniki przedstawia się w postaci krzywej parametrycznej $\sigma_b = f(L)$, gdzie: $L = T_b(C + \log t_{re})$, $L-M$ – parametr Larsona-Millera, T_b – temperatura badania, C – stała materiałowa, t_{re} – trwałość resztkowa. Próby pełzania prowadzone celem określenia prędkości pełzania w stanie ustalonym i sporządzenia zależności Monkmana-Granta oraz Dobeša-Milički [471] wyznaczane są własną metodą nieniszczącą opracowaną przez autora, wykorzystującą zależności podane w pracy [472].



Rysunek 21. Sposób wyznaczania trwałości reszkowej na podstawie wyników przyspieszonych prób pełzania [50]



Rysunek 22. Wytrzymałość na pełzanie po eksploatacji wraz z ekstrapolacją wyników badań trwałości reszkowej do poziomu wartości naprężeń roboczych σ_r w porównaniu z wymaganą wytrzymałością na pełzanie dla materialu w stanie wyjściowym;
 R_{Zst} – czasowa wytrzymałość na pełzanie wg wymagań dla stanu wyjściowego, R_{Zep} – czasowa reszkowa wytrzymałość na pełzanie, t_o – czas obliczeniowy; σ_{ep} – przewidywany poziom naprężenia dalszej eksploatacji; σ_r – naprężenie robocze

W ocenie stanu materiału po eksploatacji w warunkach pełzania wykorzystuje się wyniki prób rozciągania w podwyższonej temperaturze, prób udatności, pomiarów twardości oraz zmęczenia niskocyklowego i szybkości rozwoju szczeliny. Pomiary twardości są dokonywane na obiekcie najczęściej w miejscu wykonania repliki odwzorowującej obraz struktury. Nieniszczące metody badań stosowane obligatoryjnie w ocenie stanu elementu to badania: defektoskopowe, penetracyjne, magnetyczne, ultradźwiękowe i endoskopowe. Ważne znaczenie odgrywają metalograficzne, nieniszczące metody badań replik wykonanych w wybranym miejscu analizowanego obiektu i badanych przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego, a w przypadku zgrubnych ocen też świetlnego. Metalograficzne techniki badań wyczerpania materiału opierają się na analizie czynników powodujących przejście materiału do III stadium pełzania przyspieszonego [50, 447, 463, 475, 476].

Zgodnie z zależnością (1) ocenie podlega stan wewnętrznych uszkodzeń ω związanych z zarodkowaniem i rozwojem pustek [477-479] oraz elementy struktury, np. wielkość ziarna, podziarna lub powierzchnia właściwa granic ziarn, rodzaj wydzielen, ich wzajemny udział, wielkość, kształt i rozmieszczenie, odległość między cząstkami, struktura dyslokacyjna ziarn i granic ziarn. Dotychczasowe badania stopnia degradacji struktury oraz stanu wewnętrznych uszkodzeń nakazują dużą ostrożność w stosowaniu metod metalograficznych i ustalaniu związków pomiędzy strukturą a trwałością. Szczególnie dotyczy to techniki replik wykonywanych bezpośrednio na obiekcie. Technika ta wymaga odpowiedniej wiedzy popartej kwalifikacją struktury i uszkodzeń wewnętrznych oraz atlasem obrazów struktury odpowiadających określonemu stopniowi wyczerpania, zweryfikowanych wynikami niszczących badań pełzania materiałów po różnym okresie eksploatacji. Ponadto istotnym jest doświadczenie w zakresie wykonywania kolejnych etapów preparatyki oraz właściwe zastosowanie skaningowego mikroskopu elektronowego i umiejętna interpretacja uzyskiwanego w nim obrazu mikrostruktury.

Bardziej wiarygodne są oceny związków między stanem wewnętrznych uszkodzeń materiałów pracujących w warunkach pełzania a trwałością resztkową i stopniem wyczerpania, pomimo trudności w wyborze reprezentatywnych miejsc do badań. Doświadczenia, w tym własne autora, w zakresie analizy procesów niszczenia materiałów elementów instalacji energetycznych pozwoliły wyodrębnić 4 główne klasy wewnętrznych uszkodzeń wskutek długotrwałej eksploatacji, którym przypisuje się określony czas dalszej eksploatacji lub zaleca się odpowiednie postępowanie (rys. 8) [447, 463, 479-483].

Złożoność wymienionych zagadnień stała u podstaw opracowania niniejszej monografii naukowej, uwzględniającej współczesny stan wiedzy na temat żarowytrzymałości stali stopowych i trwałości wykonanych z nich elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznych, ze szczególnym uwzględnieniem wyników własnych badań autora w tym zakresie, dla dokonania podsumowania własnych działań w zakresie metodologii obiektywnej oceny trwałości materiału pracującego w warunkach pełzania, w oparciu o zespół materiałoznawczych metod i technik badawczych, w tym badań metalograficznych, badań własności mechanicznych i metod obliczeniowych, co stanowi istotę kolejnych rozdziałów niniejszej monografii. Przedstawiono w niej również opis procesu degradacji materiału podczas długotrwałej eksploatacji w warunkach pełzania, zmian jego struktury i rozwoju wewnętrznych uszkodzeń, a także związanych z tym zmian własności mechanicznych, jako podstawy opracowania obiektywnej metody oceny stanu materiału i jego przydatności do dalszej eksploatacji w warunkach pełzania, z uwzględnieniem materiałoznawczej interpretacji przyczyn zmian struktury i własności oraz oceny trwałości stali stosowanych na elementy energetyczne pracujące w warunkach pełzania. Wiedza podsumowana w dalszej części niniejszej monografii umożliwi optymalne wykorzystanie elementów konstrukcyjnych instalacji energetycznej poddanych długotrwałej eksploatacji w warunkach podwyższonej temperatury, naprężenia oraz agresywnego środowiska, zwłaszcza tych które przekroczyły obliczeniowy czas pracy 100 000 godzin, z punktu widzenia czynników eksploatacyjnych, ekonomicznych i warunków bezpieczeństwa.