

# FITNESS FOR SERVICE

## OCENA REAKTORA PRACUJĄCEGO W WARUNKACH PEŁZANIA



### MATEUSZ WRÓBEL

Specjalista ds. Rozwoju  
Badań Laboratoryjnych  
Wydział Badań Materiało-  
wych i Ekspertyz  
Centralne Laboratorium  
Dozoru Technicznego



### TOMASZ KLINKOSZ

Ekspert Urzędzeń  
Ciśnieniowych  
Dział Oceny Zgodności  
Urząd Dozoru Technicznego  
Oddział w Gdańsku



### MARIUSZ ŁUCKI

Główny Specjalista ds. Roz-  
woju Badań Laboratoryjnych  
Wydział Badań Materiało-  
wych i Ekspertyz  
Centralne Laboratorium  
Dozoru Technicznego

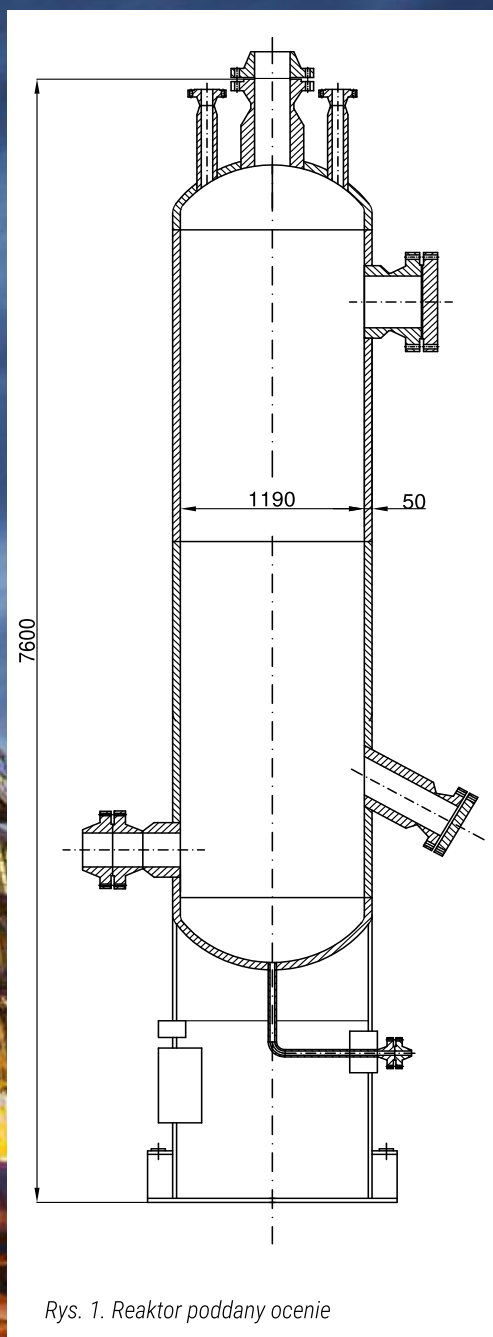
W BIULETYNIE „INSPEKTOR. TECHNIKA I BEZPIECZEŃSTWO 2/2021” OPUBLIKOWANO ARTYKUŁ PT. „OCENA WPŁYWU USZKODZEŃ NA BEZPIECZEŃSTWO EKSPLOATACJI URZĄDZEŃ CIŚNIENIOWYCH. WSTĘP DO METODOLOGII FITNESS FOR SERVICE. MATERIAŁ WPROWADZAŁ DO TEMATYKI FITNESS FOR SERVICE. W NINIEJSZYM ARTYKULE PRZYBLIŻONO METODOLOGIĘ OCENY FITNESS FOR SERVICE NA PRZYKŁADZIE URZĄDZENIA PRACUJĄCEGO W WARUNKACH PEŁZANIA.

Pełzanie jest mechanizmem degradacji, na wystąpienie którego narażone są materiały długotrwale eksploatowane powyżej tzw. temperatury granicznej. W wyniku liczonej w setki tysięcy godzin pracy w podwyższonej temperaturze i przy jednoczesnym działaniu naprężeń, dochodzi do powstania trwałych odkształceń materiału. Towarzyszą im często zmiany w budowie mikrostruktury. Ocena materiałów pracujących w warunkach pełzania obejmuje zazwyczaj wykonanie szeregu badań diagnostycznych, takich jak: badania struktury, badania NDT, pomiary geometrii danego komponentu w celu wykrycia odkształceń plastycznych. Trudności dostarcza oszacowanie pozostałej trwałości eksploatacyjnej danego urządzenia. Sposób podejścia do tego typu problemów został opisany w dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service, June 2016.

**N**a wstępie warto przypomnieć, że dokument API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service jest zbiorem procedur pozwalających na ocenę urządzeń ciśnieniowych z wykrytymi uszkodzeniami oraz na szacowanie ich pozostałej trwałości eksploatacyjnej. W rozdziale 10 (Part 10 – Assessment of components operating in the creep range) zawarto wytyczne dotyczące oceny trwałości eksploatacyjnej urządzeń pracujących w warunkach pełzania.

### OPIS PRZEDMIOTU ANALIZY

Analizie został poddany reaktor pracujący w instalacji wytwórni i odzysku wodoru. Aparat ten służy do konwersji cięższych węglowodorów do metanu. Medium roboczym jest gaz procesowy. Poglądowy szkic urządzenia przedstawiono na Rysunku 1.



Rys. 1. Reaktor poddany ocenie

Reaktor został oddany do użytku w 1999 r. Projektowany czas eksploatacji wynosił 100 000 h i został przekroczony. Wobec tego urządzenie poddano ocenie trwałości eksploatacyjnej zgodnie z metodologią Fitness For Service. Podjęto próbę przeprowadzenia oceny na poziomie 2.

### DANE DOTYCZĄCE REAKTORA

Ocenie Fitness For Service należy poddawać poszczególne komponenty danego aparatu. W przypadku analizowanego reaktora można wyróżnić m.in. płaszcz, dna elipsoidalne i króćce. Na potrzeby niniejszego artykułu prezentowana metodologia będzie ograniczona wyłącznie do oceny płaszczu.

Materiał, który wykorzystano do budowy urządzenia to ASTM A387 Grade F22 Class 1. Należy on do grupy stali chromowo-molibdenowych typu

2.25Cr-1Mo. Temperatura graniczna dla tej grupy materiałów wynosi 427°C (wg Table 4.1 – Temperature Limit Used To Define The Creep Range, API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service). Temperatura robocza aparatu przekracza tę wartość, co potwierdza eksploatację w warunkach pełzania. Dane dotyczące płaszczu reaktora zestawiono w Tabelcy 1.

Tabelca 1. Dane dotyczące płaszczu reaktora

Płaszcz	
Materiał	ASTM A387 Grade F22 Class 1
Ciśnienie obliczeniowe płaszczu, $P$	3,8MPa
Ciśnienie robocze	3,18/3,05MPa
Temperatura obliczeniowa, $T$	540°C
Temperatura robocza	455/488°C
Nadatek na korozję/FCA	3/0,75mm
Średnica zewnętrzna, $D_o$	1290mm
Grubość nominalna, $t_{nom}$	50mm
Naprężenia dopuszczalne, $S_a$	53,89MPa
Współczynnik wytrzymałościowy złącza spawanego, $E$	1

### STOSOWALNOŚĆ I OGRANICZENIA PROCEDUR OCENY

Bardzo ważnym aspektem przy wykorzystaniu metodologii Fitness For Service jest znajomość zakresu stosowalności i ograniczeń poszczególnych procedur oceny.

#### W przypadku analizy pod kątem pełzania komponenty poddawane ocenie na poziomie 1 i 2 nie mogą zawierać dodatkowych uszkodzeń

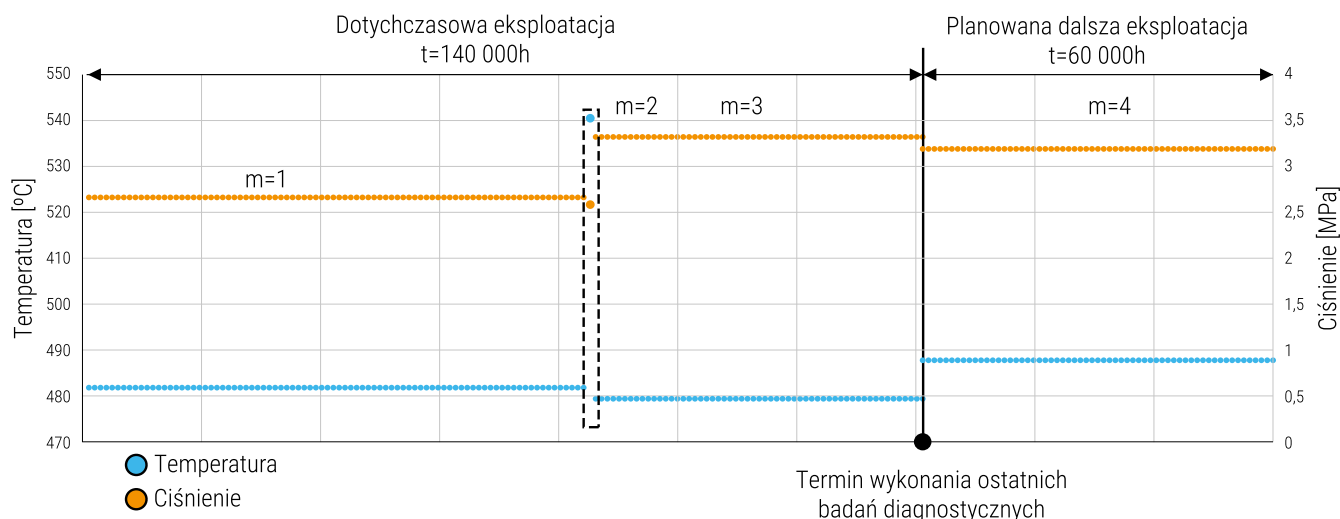
Ubytki grubości materiału – pocienienia korozyjne i wżery
Pęcherze wodorowe (blistering), pęknięcia typu HIC lub SOHIC wynikające z oddziaływania siarkowodoru
Niewspółosiowość złączy spawanych, owalizacja, wybrzuszenia przekraczające przyjęte zakresy tolerancji
Wgniecenia i inne uszkodzenia mechaniczne
Pęknięcia
Zmiany mikrostrukturalne, np. grafytyzacja, wydzielenia fazy sigma, nawęglenie, atak wodorowy

Niespełnienie tych, jak i innych warunków sprawia, że konieczne staje się przeprowadzenie oceny na poziomie 3, która jest znacznie bardziej skomplikowana i wymaga m.in. stosowania technik numerycznych do określenia stanu naprężeń.

## HISTORIA EKSPLOATACJI

Do przeprowadzenia oceny Fitness For Service konieczna jest analiza historii pracy danego urządzenia. Na podstawie danych zebranych w toku eksploatacji ustalono, że parametry robocze reaktora podlegały wahaniom. Zmiany te są istotne i mogą mieć wpływ na wynik oceny, dlatego konieczne staje się określenie tzw. cykli operacyjnych.

W prezentowanym przykładzie wyróżniono 4 cykle operacyjne, przy czym cykl m=4 dotyczy przyszłych planowanych warunków eksploatacji. Dla każdego z cykli operacyjnych konieczne jest obliczenie trwałości podczas pracy w warunkach pełzania, ułamków uszkodzenia, a następnie porównanie ich z wartością kryterialną. Cykle operacyjne przyjęte do analizy przedstawiono na Rysunku 2. Warunki pracy i czasy trwania każdego z cykli zestawiono w Tabelicy 2.



Rys. 2. Cykle operacyjne przyjęte do analizy

Tabela 2. Warunki pracy każdego z cykli eksploatacyjnych

Parametry	Cykle operacyjne			
	m=1	m=2	m=3	m=4
Temperatura [°C]	482	540	480	488
Temperatura [°F]	900	1004	896	910
Ciśnienie [MPa]	2,66	2,6	3,3	3,18
Ciśnienie [ksi]	0,39	0,47	0,38	0,46
Czas eksploatacji [h]	84 000	1000	55 000	60 000
	Σ140 000			

## WYNIKI BADAŃ DIAGNOSTYCZNYCH

W trakcie ostatniego postoiu remontowego reaktor został poddany badaniom diagnostycznym. Badania wizualne dały wynik pozytywny. Podczas badań magnetyczno-proszkowych i ultradźwiękowych wykonanych na wybranych złączach spawanych nie wykazano obecności wskazań nieakceptowalnych. Wyniki pomiarów grubości nie wskazują na występowanie pocienień. Średnia zmierzona grubość płaszczka wynosi 52,7 mm. Badania materiału metodą replik potwierdzają występowanie struktury ferrytyczno-perlitycznej. Nie stwierdzono obecności pustek pełzaniowych. Na podstawie analizy wykresu Nelsona [1] stwierdzono, że reaktor nie jest narażony na wystąpienie wysokotemperaturowego ataku wodorowego (HTHA). Z przeprowadzonej analizy mechanizmów degradacji wynika również, że urządzenie nie pracuje w tzw. serwisie kwaśnym (wet H<sub>2</sub>S), czyli w warunkach, dla których istnieje zagrożenie wystąpienia uszkodzeń, tj.: blistering, HIC, SOHIC i SSC.

**Nie stwierdzono tym samym obecności ograniczeń uniemożliwiających przeprowadzenie oceny na poziomie 2.**

## OCENA TRWAŁOŚCI PODCZAS PRACY W WARUNKACH PEŁZANIA

W dokumencie API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service opisano kilka modeli oceny trwałości podczas pracy w warunkach pełzania. Wykorzystują one m.in. dane pochodzące z Materials Properties Council (MPC) Project Omega i równania Larsona-Millera. W obu przypadkach dla danych warunków eksploatacji (temperatury, naprężenia, czasu pracy) wyznacza się trwałość i odpowiednie ułamki uszkodzeń. W tym artykule przybliżone zostanie rozwiązanie bazujące na równaniach Larsona-Millera.

Obliczenia rozpoczyna się od wyznaczenia składowych naprężeń głównych. W analizowanym przypadku rozpatrywany jest komponent o stosunkowo prostej geometrii, dlatego możliwe jest zastosowanie poniższych równań. W przeciwnym wypadku konieczne może okazać się przeprowadzenie analiz numerycznych.

Obliczenia trwałości dla cyklu operacyjnego  $m=1$  przedstawiono poniżej.

$$(1) \quad \sigma_1 = \frac{PD_{mean}}{2t_{comp}} \cdot L_f = \frac{P \cdot \frac{D_0 + (D_0 - 2t_{rd})}{2}}{2t_{rd}} \cdot L_f = \frac{2,66 \cdot \frac{1290 + (1290 - 2 \cdot 52,7)}{2}}{2 \cdot 52,7} \cdot 1 = 31,23 \text{ MPa}$$

$$(2) \quad \sigma_2 = \frac{PD_{mean}}{4(t_{comp} - t_{si})} \cdot L_f = \frac{P \cdot \frac{D_0 + (D_0 - 2t_{rd})}{2}}{4(t_{rd} - t_{si})} \cdot L_f = \frac{2,66 \cdot \frac{1290 + (1290 - 2 \cdot 52,7)}{2}}{4 \cdot (52,7 - 0)} \cdot 1 = 15,61 \text{ MPa}$$

$$(3) \quad \sigma_3 = 0$$

Następnie określa się wartość naprężeń zredukowanych.

$$(4) \quad \sigma_e = \frac{1}{\sqrt{2}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2]^{0,5} = \frac{1}{\sqrt{2}} [(31,23 - 15,61)^2 + (31,23 - 0)^2 + (15,61 - 0)^2]^{0,5}$$

$$\sigma_e = 27,04 \text{ MPa}$$

Realizując procedurę oceny opisaną w API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service, konieczne jest zweryfikowanie dodatkowych kryteriów związanych m.in. z granicą plastyczności materiału w temperaturze pracy czy też działaniem naprężeń zewnętrznych (np. obciążenia wiatrem). W omawianym przykładzie wszystkie dodatkowe warunki zostały spełnione. Stosowne obliczenia, z uwagi na ich złożoność, nie zostały przedstawione w niniejszym artykule.

Równania Larsona-Millera służą do wyznaczania trwałości podczas pracy w warunkach pełzania. W celu przeprowadzenia obliczeń konieczna jest konwersja jednostek na naprężenia wyrażonych w [ksi] i temperaturę wyrażoną w [°F]. W obliczeniach wykorzystuje się tzw. parametry Larsona-Millera, które zależą od rodzaju materiału. Zestawienie parametrów Larsona-Millera dla stali z grupy 2.25Cr-1Mo zawarto w Tablicy 3.	$\sigma_1 = 31,23 \text{ MPa} \rightarrow 4,53 \text{ ksi}$
	$\sigma_2 = 15,61 \text{ MPa} \rightarrow 2,26 \text{ ksi}$
	$\sigma_3 = 0$
	$\sigma_e = 27,04 \text{ MPa} \rightarrow 3,92 \text{ ksi}$
	$482^\circ\text{C} \rightarrow 900^\circ\text{F}$

Tablica 3. Parametry Larsona-Millera dla stali 2.25Cr-1Mo

Material	Parametry	Minimalny parameter Larsona-Millera – LMP <sub>m</sub>
2.25Cr-1Mo	A <sub>0</sub>	$4,3981719 \cdot 10^1$
	A <sub>1</sub>	$-8,4656117 \cdot 10^1$
	A <sub>2</sub>	$-4,0483005 \cdot 10^1$
	A <sub>3</sub>	$2,6236081 \cdot 10^{-1}$
	A <sub>4</sub>	$1,5373650 \cdot 10^1$
	A <sub>5</sub>	$4,9673781 \cdot 10^{-2}$
	A <sub>6</sub>	$6,6049429 \cdot 10^{-1}$
	C <sub>LMP</sub>	20,0

Dalsze obliczenia z wykorzystaniem parametrów Larsona-Millera nakreślono poniżej.

$$(5) \quad S_s = (\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2)^{0,5} = (4,53^2 + 2,26^2 + 0^2)^{0,5} = 5,06 \text{ ksi}$$

$$(6) \quad J_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 4,53 + 2,26 + 0 = 6,79 \text{ ksi}$$

$$(7) \quad S_{eff} = \sigma_e \cdot \exp \left[ 0,24 \left( \frac{J_1}{S_s} - 1 \right) \right] = 3,92 \cdot \exp \left[ 0,24 \left( \frac{6,79}{5,06} - 1 \right) \right] = 4,25 \text{ ksi}$$

$$(8) \quad LMP(S_{eff}) = \frac{A_0 + A_2 S_{eff}^{0,5} + A_4 S_{eff} + A_6 S_{eff}^{1,5}}{1 + A_1 S_{eff}^{0,5} + A_3 S_{eff} + A_5 S_{eff}^{1,5}}$$

$$LMP(S_{eff}) = \frac{4,3981719 \cdot 10^{-1} - 4,0483005 \cdot 10^1 \cdot 4,25^{0,5} + 1,5373650 \cdot 10^1 \cdot 4,25 + 6,6049429 \cdot 10^{-1} \cdot 4,25^{1,5}}{1 - 8,4656117 \cdot 10^{-1} \cdot 4,25^{0,5} + 2,6236081 \cdot 10^{-1} \cdot 4,25 + 4,9673781 \cdot 10^{-2} \cdot 4,25^{1,5}}$$

$$(9) \quad \log_{10}[L] = \frac{1000 \cdot LMP(S_{eff})}{(T_{refa} + T)} - C_{LMP}$$

$$\log_{10}[L] = \frac{1000 \cdot 39,3}{(460 + 900)} - 20 = 8,90$$

$$(10) \quad L = 10^{8,90} = 8 \cdot 10^8 h$$

Trwałość w warunkach eksploatacji określonych cyklem operacyjnym  $m=1$  wynosi  $8 \cdot 10^8$  h. Ułamek uszkodzenia dla  $m=1$  wynosi zatem.

$$(11) \quad D_c = \sum_{n=1}^N \frac{t}{L} = \frac{84\,000}{8 \cdot 10^8} = 1,05 \cdot 10^{-4}$$

## OBLICZENIA DLA POZOSTAŁYCH CYKLI EKSPLOATACYJNYCH

Analogiczne obliczenia przeprowadzono dla pozostałych cykli operacyjnych. Otrzymane wyniki zestawiono w Tabelicy 4.

Tabelica 4. Wyniki obliczeń dla każdego z cykli operacyjnych

Parametry	Cykle operacyjne			
	m=1	m=2	m=3	m=4
Temperatura [°F]	900	1004	896	910
Ciśnienie [ksi]	0,39	0,47	0,38	0,46
Czas eksploatacji [h]	84 000	1000	55 000	60 000
$\sigma_1$ [ksi]	4,53	5,47	4,46	5,60
$\sigma_2$ [ksi]	2,26	2,73	2,23	2,80
$\sigma_3$ [ksi]	0	0	0	0
$\sigma_p$ [ksi]	3,92	4,73	3,86	4,84
$S_s$ [ksi]	5,06	6,11	4,98	6,25
$J_1$ [ksi]	6,79	8,19	6,69	8,39
$S_{eff}$ [ksi]	4,25	5,13	4,19	5,26
$LMP(S_{eff})$ [ksi]	39,30	38,60	39,36	38,51
L [h]	$8,00 \cdot 10^8$	$2,35 \cdot 10^6$	$1,07 \cdot 10^9$	$1,30 \cdot 10^8$
$D_c$	$1,05 \cdot 10^{-4}$	$4,26 \cdot 10^{-4}$	$5,15 \cdot 10^{-5}$	$4,62 \cdot 10^{-4}$

Całkowity ułamek uszkodzenia jest sumą ułamków uszkodzeń wyznaczonych dla poszczególnych cykli operacyjnych i wynosi:

$$(12) \quad D_c^{total} = 1,05 \cdot 10^{-4} + 4,26 \cdot 10^{-4} + 5,15 \cdot 10^{-5} + 4,62 \cdot 10^{-4} = 1,04 \cdot 10^{-3}$$

W celu spełnienia kryteriów oceny wyznaczona wartość musi być mniejsza od wartości kryterialnej

$$(13) \quad D_c^{total} = \sum_{m=1}^M D_c \leq D_c^{allow}$$

$$D_c^{total} = 1,04 \cdot 10^{-3} \leq D_c^{allow} = 0,8 - \text{warunek jest spełniony}$$

**Płaszcz reaktora spełnia kryteria oceny wg API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service – Part 10 – Assessment of components operating in the creep range – Level 2 Assessment – Larson-Miller Parametr.**

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI KOŃCOWE

Z przeprowadzonej analizy wynika, że oceniany komponent reaktora – płaszcz – uległ uszkodzeniom w wyniku pełzania w niewielkim stopniu. Obliczona wartość całkowitego uszkodzenia podczas pełzania z wykorzystaniem równań Larsona-Millera spełnia kryteria podane w API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service – Assessment of components operating in the creep range – Level 2 Assessment.

Analizę przeprowadzono, zakładając przyszły czas eksploatacji wynoszący 60 000 h, liczony od daty wykonania ostatnich badań materiałowych, kiedy to aparat miał przepracowanych ok. 140 000 h. Wyniki otrzymanych badań stanowiły podstawę do oceny trwałości eksploatacyjnej reaktora, zgodnie z metodologią zawartą w API 579-1/ASME FFS-1 Fitness For Service.

Dla analizowanego reaktora konieczne jest monitorowanie i utrzymywanie zapisów dotyczących parametrów pracy urządzenia. Należy wykonywać regularne badania diagnostyczne w celu weryfikacji przyjętych założeń.

## SPIS SKRÓTÓW I OZNACZEŃ

$D_c$	uszkodzenie pełzaniowe <i>creep damage</i>
$D_{mean}$	średnia średnica walca lub sfery <i>mean diameter of a cylinder or sphere</i>
$D_c^{allow}$	dopuszczalne uszkodzenia pełzaniowe <i>allowable creep damage</i>
${}^n D_c$	uszkodzenia pełzaniowe w n-tym okresie czasu <i>creep damage for the time period</i>
$D_c^{total}$	całkowite uszkodzenia pełzaniowe uwzględniające wszystkie cykle pracy <i>total creep damage considering all operating cycles</i>
$L_f$	współczynnik Lorentza <i>Lorentz Factor</i>
${}^n L$	trwałość przy danej historii obciążania w n-tym przyroście czasu <i>rupture time for the loading history for the time increment</i>
$LMP({}^n S_{eff})$	parameter Larsona-Millera będący funkcją naprężenia <i>Larson-Miller parameter at stress</i>
m	aktualny numer cyklu operacyjnego <i>current operating cycle number</i>
P	ciśnienie wewnętrzne walca lub sfery <i>pressure inside of a cylinder or sphere</i>
$R_i$	promień wewnętrzny walca lub sfery <i>inside radius of a cylinder or sphere</i>
$R_{mean}$	średni promień walca lub sfery <i>mean radius of a cylinder or sphere</i>
${}^n S_{eff}$	naprężenia zredukowane użyte do obliczenia pozostałego okresu trwałości za pomocą parametru Larsona-Millera dla n-tego przyrostu czasu <i>effective stress used to compute the remaining life in terms of the Larson-Miller parameter for the time increment</i>
$\sigma_e$	naprężenia zredukowane <i>effective stress</i>
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	składowe naprężenia głównych <i>principal stress</i>
t	czas <i>time</i>
T	temperatura <i>temperature</i>
$t_{comp}$	grubość elementu skorygowana o wielkość ubytku materiału i nadkładu na korozję zgodnie z wymaganiami <i>component thickness adjusted for metal loss and corrosion allowance as required</i>
$t_{sl}$	grubość warunkowana działaniem dodatkowych obciążeń <i>thickness required for supplemental loads</i>

Literatura:

1. API RP 941 – Steels for Hydrogen Service at Elevated Temperatures and Pressures.