

Andrzej MAJCHER

INSTYTUT TECHNOLOGII EKSPLOATACJI – PIB,
ul. K. Pułaskiego 6/10, 26-600 Radom

Programowanie dedykowanych testów badawczych w urządzeniu do badań pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu

Dr inż. Andrzej MAJCHER

Ukończył Wydział Elektroniki Politechniki Warszawskiej. W 1999 uzyskał stopień doktora w dziedzinie Budowy Maszyn. Obecnie kieruje Zakładem Systemów Sterowania Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB w Radomiu. Uczestniczył w realizacji wielu projektów badawczych oraz wdrożeń przemysłowych, dotyczących głównie aparatury procesowej, pomiarowej i testującej. Zainteresowania zawodowe to projektowanie zaawansowanych systemów sterowania i pomiarów.

e-mail: Andrzej.Majcher@itee.radom.pl



Streszczenie

Poszukiwaniu szybkich metod oceny przydatności materiałów w zastosowaniach do budowy elementów maszyn pracujących w podwyższonych temperaturach i zmiennych naprężeniach towarzyszy rozwój urządzeń ułatwiających tego typu badania. W artykule przedstawiono metodę programowania przebiegu testów w klasycznym urządzeniu do prób pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu. Metoda umożliwia wykonywanie normatywnych testów pełzania (PN-EN ISO 204) oraz dedykowanych testów o programowanych obciążeniach niskocyklowych oraz różnych profilach zmian temperatury i naprężenia. Przedstawiono sposób przygotowania testów badawczych oraz uzyskiwane przebiegi, w tym symulacje rzeczywistych obciążeń elementów maszyn pracujących w warunkach zmiennych temperatur i naprężeń. Uzyskana, z wykorzystaniem przedstawionej metody, funkcjonalność urządzenia pozwala na badania nad nowymi procedurami oceny trwałości elementów maszyn i instalacji w przemyśle energetycznym, lotnictwie, przemyśle petrochemicznym i chemicznym.

Słowa kluczowe: pełzanie, pełzarka, przyspieszone badania pełzania, zmęczenie niskocyklowe, projektowanie oprogramowania urządzeń kontrolno-pomiarowych.

The programming of dedicated tests in a device for uniaxial creep testing in tension

Abstract

The search for quick methods for the assessment of usefulness of materials for structural machine elements operating at elevated temperatures and changeable stresses is accompanied by a significant development of devices enabling designers to perform the tests. The paper presents a programming method for the test run of the classical machine for uniaxial creep testing in tension. The method allows one to conduct normative creep tests (according to PN-EN ISO 204 standard) and dedicated tests with programmable low-cycle loads as well as varied temperature and stress change profiles. Preparation of the research test and the obtained results are presented. The results also contain the simulation of the real load of machines operating under variable temperature and stress. Using the presented method, the functionality of the device allows research on new procedures for evaluating the durability of machines and installations in the energy industry, aerospace, petrochemical and chemical industries.

Keywords: creep, creep tester, accelerated creep testing, low cycle fatigue, software design of the test devices.

1. Wprowadzenie

Testy pełzania są dobrze znanym typem badań materiałowych. Wykonywane są one zwykle w pełzarkach pionowych, w których jednoosiowe naprężenie próbki uzyskiwane jest grawitacyjnie, za pomocą kalibrowanych obciążników lub energią elektryczną - za pomocą silnika z odpowiednim sterownikiem. Oba typy pełzarek posiadają wielosekcyjną komorę grzewczą utrzymującą prawidłowy rozkład wymaganej temperatury próbki. Urządzenia takie nie nadążają jednak za tendencjami rozwoju badań materiałowych.

Jedną z nich jest opracowywanie metodyk mniej czasochłonnej oceny odporności materiału na pełzanie. Klasyczne pełzarki są mało przydatne w prowadzeniu tego typu badań. Do nowych metodyk konstruowane są urządzenia mogące generować niskocyklowe obciążenia termiczno – mechaniczne, obciążenia typu cyklicznego pełzania do zerwania, testy pełzania w funkcji głębokości identyfikacji oraz urządzenia mogące mierzyć szybkość pełzania [1, 2, 3].

W opracowanym rozwiązaniu konstrukcyjnym urządzenia mogącego realizować zarówno normatywne testy pełzania jak i badania programowane przez użytkownika [4] problemem jest obsługa programowa realizacji obu typów testów, zarówno z punktu widzenia operatora jak i implementacji w systemie sterowania urządzeniem. Klasyczne pełzarki posiadają oprogramowanie ukierunkowane głównie na spełnienie rygorystycznych wymagań normy próby pełzania PN-EN ISO 204 oraz konfigurowanie różnych typów przyrządów pomiarowych wchodzących w skład systemu sterowania urządzeniem [5]. Praktycznie nie istnieje w nich możliwość realizacji innych, poza opisanymi w normie, testów. W urządzeniach do badań wytrzymałościowych, w których przebiegi testów są bardziej elastyczne (np.: testy z obciążeniami cyklicznymi i obciążeniami wieloosiowymi) stosuje się podział testu na kroki i graficzne ustalenie parametrów testu dla każdego kroku [6]. Jednak w przypadku badań pełzania istnieje problem zmiany parametrów testów – wprowadzania profili temperatury próbki, obciążeń niskocyklowych, obciążeń o regulowanych czasach zmian narastania i opadania, symulacji rzeczywistych obciążeń termicznych i naprężeniowych elementów maszyn.



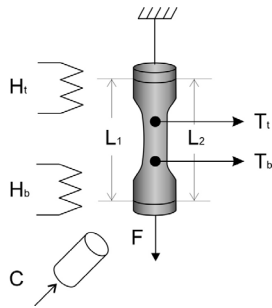
Rys. 1. Widok wielofunkcyjnego urządzenia do testów pełzania
Fig. 1. View of the multifunctional creep tester

W artykule przedstawiono własne rozwiązanie, które umożliwia prowadzenie normatywnych testów pełzania oraz testów programowanych przez użytkownika, obejmujących obciążenia niskocyklowe, o zmiennych amplitudach naprężenia i temperatury. Zastosowana metoda w połączeniu z modyfikacją tradycyjnego układu pełzarki oraz zaawansowanym systemem sterowania pozwala na badania nad oceną materiałów konstrukcyjnych elementów maszyn, szczególnie pracujących w warunkach zmiennych obciążeń i wysokich temperatur.

2. Konstrukcja urządzenia

Konstrukcja urządzenia, opracowanego i wykonanego w ITeE-PIB, wykorzystuje rozwiązania klasycznych pełzarek (rys. 1).

Próbka mocowana jest pionowo do stałej górnej belki. Dolne zamknięcie układu sił w urządzeniu stanowi belka dolna, w której osadzony jest zespół łożyskowania mechanizmu śrubowotocznego, odpowiedzialnego za realizację ruchu belki obciążającej próbkę. Ruch obrotowy śruby toczonej, uzyskiwany jest napędem z silnikiem synchronicznym i przekładnią planetarną. Mocowania próbki gwarantują wymaganą przy naprężeniach jednoosiowych centryczność przykładanej siły [7].



Rys. 2. Schemat układów pomiarowych i wykonawczych urządzenia
Fig. 2. Schematic diagram of the measuring system of the device

Długość próbki (rys. 2) mierzona jest jako średnia arytmetyczna $L1$ i $L2$ - wyników pomiarów z dwóch czujników przesunięcia typu LVDT (Linear Variable Differential Transformer).

Grzanie próbki odbywa się w dwusekcyjnym piecu grzewczym, wyposażonym w grzałki H_t i H_b . Temperatura mierzona jest dwoma termoparami (temperatury T_t i T_b) umieszczanymi bezpośrednio na próbce. Dodatkowym elementem pieca jest układ chłodzenia wymuszonym obiegiem powietrza (C). Pozwala on na uzyskiwanie profili temperatury o większej dynamice niż w przypadku stygnięcia swobodnego.

System sterowania urządzeniem, w warstwie sprzętowej, składa się z panela operatorskiego, komputera PC, zespołu sterownika PLC z dodatkowymi modułami. Panel operatora ułatwia czynności związane z mocowaniem próbki. Komputer PC, współpracujący z zespołem sterownika PLC, służy do obsługi prowadzonych testów, m.in. wprowadzania parametrów i nadzoru testów o parametrach normatywnych i programowanych, wizualizacji stanu urządzenia i przebiegu testu, kalibracji torów pomiarowych, zapisu i analizy danych pomiarowych. W zespole sterownika PLC implementowane są podstawowe układy regulacji urządzenia: regulatory temperatury i siły.

3. Programowanie przebiegów testów

Programowanie przebiegów testów odbywa się z wykorzystaniem metody sterowania wsadowego [8]. Urządzenie realizuje rozkazy podstawowe, których parametry określają warunki prowadzenia kolejnych faz testu. Rozkazy podstawowe wykonywane są w module sterownika PLC, natomiast ich zadawanie, nadzór kolejności wykonywania, przerywanie odbywa się w komputerze PC. W ten sposób zachowano cechy systemu czasu rzeczywistego sterownika PLC oraz uwolniono się od ograniczeń niedeterministycznego systemu operacyjnego komputera, unikając konieczności zastosowania języka wysokiego poziomu z rozszerzeniami czasu rzeczywistego [9]. Połączenie pomiędzy modułem PLC i komputerem PC zrealizowane jest łączem ethernetowym, a wymiana danych odbywa się przy wykorzystaniu technologii OPC [10].

Sekwencyjna realizacja kolejnych rozkazów podstawowych prowadzi do uzyskania żadanego przebiegu testu. Parametry rozkazu określają: wymuszenia przykładane do badanej próbki, warunki zakończenia rozkazu oraz wytyczne do interpretacji wyników przez oprogramowanie typu SCADA komputera PC. Warunki zakończenia rozkazów umożliwiają ich równoległe wykonywanie. Dekompozycja, możliwych do realizacji w urządzeniu testów, na rozkazy podstawowe uwzględni bardziej kryte-

rium czytelności rozkazu dla operatora niż odzwierciedlenie zasobów systemu sterowania.

Do zadawanego naprężenia odnosi się grupa czterech rozkazów podstawowych:

Load Zero () - zerowanie tensometrycznego układu pomiaru siły,
Set Initial Load (F) - ustawianie obciążenia początkowego, eliminującego luzu w torze naprężania próbki,

Set Load (n, V, F) - ustawianie zadanego obciążenia,

Motor off () - wyłączenie układu regulacji obciążania próbki, z parametrami:

V - prędkość narastania siły rozciągającej próbkę,

F - wartość siły (N),

n - parametr decydujący o umieszczeniu danego punktu przyłożenia siły na wykresie naprężenie - odkształcenie.

Prędkość narastania wprowadzana jest jako liczba z przedziału od 1 do 6000 w jednostkach niemianowanych, niezależniących prędkości zmian siły od temperaturowych zmian długości próbki i jej relaksacji. Wartości rzeczywiste dla stałej temperatury wynoszą od 3,9 do 500 N/s dla zakresu 1 kN.

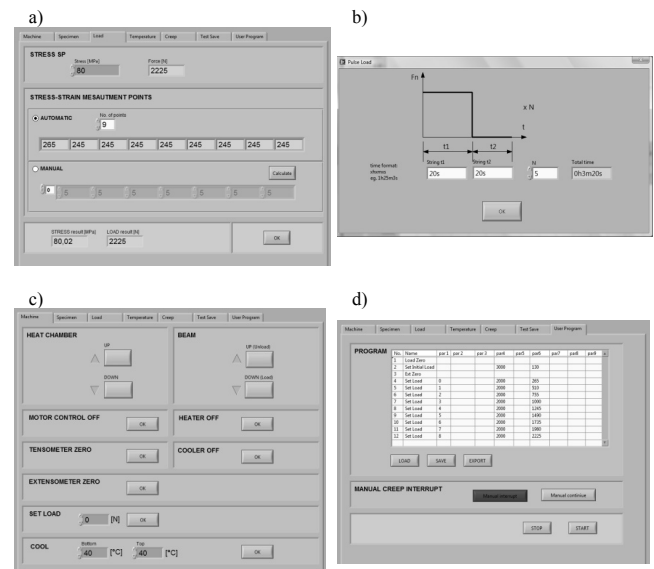
Kontroli temperatury próbki dotyczą rozkazy: *Heat* (T_1 , T_2 , t_h) - włączenie regulacji temperatury oraz *Heat off* () - wyłączenie regulacji temperatury, gdzie:

T_1 - temperatura górnej części próbki,

T_2 - temperatura dolnej części próbki,

t_h - czas wygrzewania próbki.

Proces pełzania realizowany jest rozkazem *Creep* (war), gdzie: *war* - warunek zakończenia funkcji: po określonym czasie, po zerwaniu próbki lub po osiągnięciu określonej wartości pełzania.



Rys. 3. Widok okien wprowadzania parametrów rozkazów podstawowych
a) programowanie obciążenia próbki w trybie badań normatywnych;
b) programowanie w trybie dedykowanego podprogramu;
c) zadawanie parametrów rozkazów w trybie ustawień ręcznych;
d) tabela do wpisywania rozkazów podstawowych

Fig. 3. Windows to enter basic commands

- a) test piece load programming in the normative test mode;
b) subroutine mode;
c) manual mode;
d) table for direct write basic command

Funkcje dodatkowe, wykorzystywane w testach programowanych, to:

Time out (t_o) - odmierzanie zadanego odcinka czasu, gdzie: t_o - wartość zadawanego czasu;

Ext Zero () - zerowanie wskazań czujników wydłużenia próbki (ekstensometru);

Pulse Load (t_{p1} , t_{p2} , N) - generowanie naprężeń zmiennych o określonej amplitudzie i czasie trwania, gdzie:

t_{p1} - czas trwania przyłożenia siły,

t_{p2} - czas trwania odciążenia,

N - liczba cykli przyłożenia siły i odciążenia;
Cool (T_b , T_t) - chłodzenie próbki, gdzie:
 T_b - temperatura dolnej części próbki,
 T_t - temperatura górnej części próbki;
Profile (t , F , T_b , T_t) - zadawanie profili jednoczesnych zmian siły i temperatury, gdzie:
 t - czas trwania zmiany siły,
 F - siła rozciągająca próbkę.

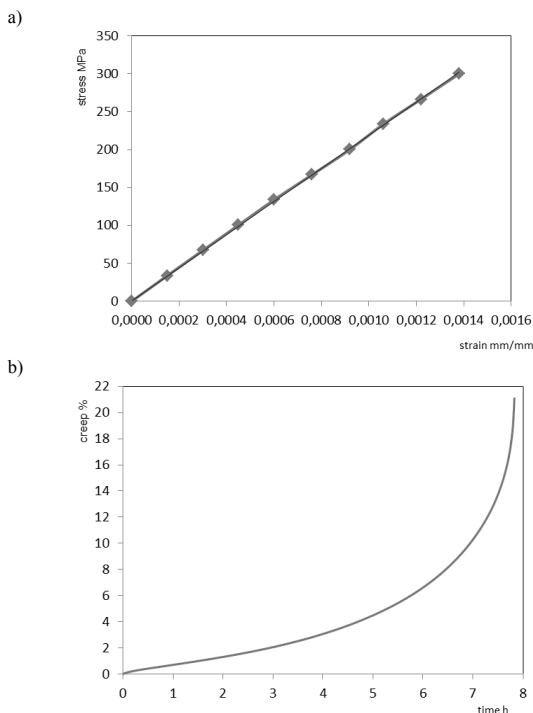
Ustawienia parametrów rozkazów podstawowych może odbywać się poprzez:

- okna programowania etapów testu pełzania (rys. 3a),
- podprogramy, wywoływane z menu tablicy rozkazów podstawowych (rys. 3b),
- okno obsługi ręcznej urządzenia, wykorzystywane w trakcie mocowania i demontażu próbki lub wymiany elementów urządzenia (rys. 3c),
- bezpośrednie wpisywanie rozkazów z parametrami do tablicy rozkazów (rys. 3d).

Tablica rozkazów podstawowych może być edytowana w zewnętrznych programach, np. arkuszach kalkulacyjnych i wprowadzana do programu obsługi urządzenia. Nie ma ograniczenia na liczbę rozkazów podstawowych umieszczonych w tablicy.

4. Uzyskiwane przebiegi testów wytrzymałościowych

Sekwencyjna realizacja rozkazów podstawowych prowadzi do realizacji: normatywnych testów pełzania, testów o programowanych zmianach obciążeń próbki oraz symulacji rzeczywistych obciążeń elementów maszyn funkcjonujących w warunkach zmiennych temperatur i naprężeń.



Rys. 4. Wykres naprężenie – odkształcenie (a) i wykres pełzania do zerwania (b) dla stali 15HM, naprężenie 300 MPa, temperatura 550 °C

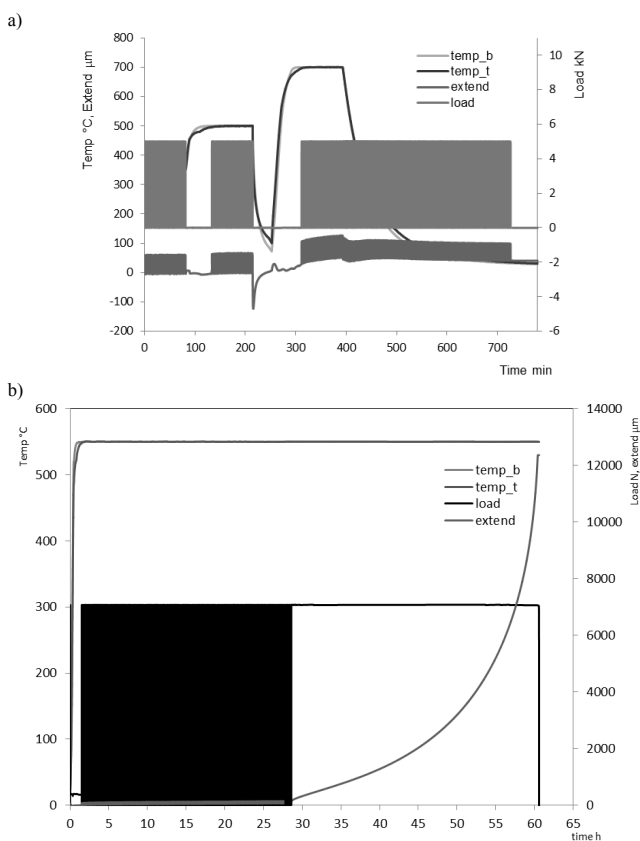
Fig. 4. Stress – strain chart (a) and rupture creep chart for 15HM steel, stress 300 MPa, temperature 550 °C

Realizacja testu normatywnego, zgodnego z normą PN-EN ISO 204, przy dziewięciu punktach charakterystyki naprężenie odkształcenie i zakończeniu testu po zerwaniu próbki, polega na wykonaniu następującej sekwencji rozkazów podstawowych:

1. *Load Zero*
2. *Set Initial Load (3000, 470)*
3. *Ext Zero*

4. *Set Load (0, 2000, 940)*
5. *Set Load (1, 2000, 1865)*
- ...
12. *Set Load (8, 2000, 8340)*
13. *Set load (4000, 470)*
14. *Heat (1h, 550, 550)*
15. *Set Load (2000, 8340)*
16. *Creep (10)*
17. *Heat off*
18. *Motor off.*

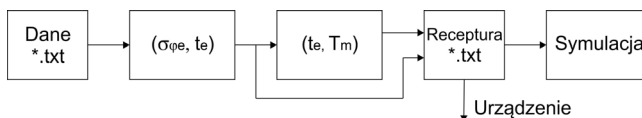
W efekcie uzyskuje się charakterystykę naprężenie odkształcenie i przebieg pełzania do zerwania (rys. 4). W teście, wygrzewanie próbki trwało 1 h, przyłożona siła 8 340 N odpowiadała naprężeniu próbki 299,92 MPa.



Rys. 5. Przebieg testu z obciążeniami niskocyklowymi i zmianami temperatury (a) oraz testu obciążeń niskocyklowych i pełzania do zerwania

Fig. 5. Low cycle loads with temperature change test (a) and low cycle load and the creep rupture test (b)

Poprzez połączenie zmian temperatury wywoływanych rozkazami *Heat* i *Cool* oraz obciążeń cyklicznych – rozkaz *Pulse* uzyskuje się przebieg testu zmiennych obciążeń niskocyklowych przy programowanych profilach temperatury (rys. 5a). Zaprogramowane zmiany temperatury to: regulacja na poziomie 300°C, grzanie do 500°C, chłodzenie wymuszone do 100°C, grzanie do 700°C, chłodzenie swobodne do 100°C. Wprowadzone obciążenie cykliczne (load) skutkuje wyraźną zmianą długości próbki (extend), pomiędzy 300 i 400 minutą przebiegu testu.



Rys. 6. Schemat algorytmu wyznaczania parametrów rozkazów podstawowych do symulacji obciążeń rzeczywistych

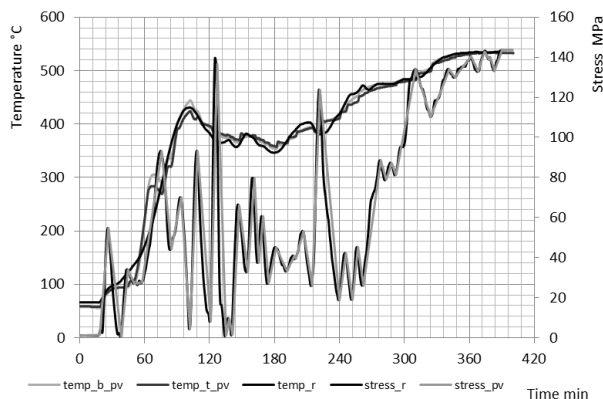
Fig. 6. Diagram of the algorithm for determining parameters of the basic commands to simulate real loads

Normatywny test pełzania może być poprzedzony obciążeniami niskocyklowymi (rys. 5b). Klasyczna realizacja tego typu badań możliwa była dotąd przy wykorzystaniu dwóch urządzeń i przetrwaniu grzania próbki.

Zaproponowany sposób programowania testów wytrzymałościowych umożliwia adekwatną symulację rzeczywistych obciążeń materiałów. Przykładowy przebieg takiej symulacji (rys. 7) jest powtórzeniem zmian naprężenia ($stress_r$) i temperatury ($temp_r$) elementu kotła parowego (komora wylotowa P4 kotła OP-1150) [11].

Program przebiegu testu jest generowany automatycznie na podstawie danych pomiarowych z pliku tekstowego (rys. 6). Wyznaczane ekstrema lokalne funkcji naprężenia (σ_{φ_e} , t_e) oraz dla czasów t_e wartości temperatury (t_e , T_e). Uzyskiwane wartości konwertowane są na parametry rozkazu *Profile* i wytwarzany jest program testu (wsad) o postaci:

1. *Profile* (18m, 30, 66, 66)
2. *Profile* (8m, 1525, 91, 91)
3. *Profile* (12m, 5, 106, 106)
-
50. *Profile* (7m, 3995, 533, 533).



Rys. 7. Przebiegi symulacji rzeczywistych warunków funkcjonowania urządzenia energetycznego (_r – sygnały rzeczywiste, _pv – sygnały odtworzone)

Fig. 7. Simulation runs for the real functioning condition of a power device (_r – real values, _pv – reproduced values)

Dodatkowy symulator służy do walidacji otrzymanego testu, pozwalając sprawdzić różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi w procedurze i wartościami z pliku wejściowego. Różnice takie wynikają przede wszystkim z zaokrągleń przy przeliczaniu naprężenia na siłę i kwantowania siły (5N) w systemie sterowania urządzeniem. Program przebiegu testu przygotowywany jest w edytorze tekstu (MS Excel). Realizacja programu przebiegu testu w urządzeniu (rys. 6b) prowadząca do odtworzenia rzeczywistych obciążeń badanego materiału przebiega w ten sposób, że warunkiem zakończenia rozkazu *Profile* jest uzyskanie zaprogramowanej siły naprężenia we właściwym czasie. Przeprowadzone próby dla innych algorytmów działania rozkazu *Profile*, w tym dla:

- ciągłej zmiany zadawanej temperatury, z różnymi przyrostami, w czasie trwania rozkazu,
- różnych warunków zakończenia rozkazu – osiągnięcie wartości zadanej temperatury mieszczącej się w przedziale o ustalonej szerokości,
- różnych wielkości kroku zmian siły, dają gorsze rezultaty.

Parametry rozkazów podstawowych pozwalają także na wykonywanie innych testów hybrydowych, będących połączeniem testów normatywnego pełzania, obciążeń niskocyklowych, obciążeń o zmiennych amplitudach i częstotliwości, programalnych zmianach temperatury.

5. Wnioski

Zastosowana metoda dała unikatowe możliwości funkcjonalne klasycznemu urządzeniu jakim jest pełzarka. Programowanie przebiegu testu odbywa się w urządzeniu lub w niezależnym arkuszu kalkulacyjnym, co w powiązaniu ze wsadowym sposobem realizacji testów, dobrze podstawowych rozkazów wykonywanych przez urządzenie, umożliwia generowanie własnych testów o programowanych zmianach naprężenia i temperatury, w tym testów odtwarzających rzeczywiste warunki funkcjonowania elementów maszyn pracujących w podwyższonej temperaturze i zwiększonym ciśnieniu. Cechy te nie ograniczają prowadzenia testów zgodnie z normą prób pełzania przy jednoosiowym rozciąganiu. Wszystkie rodzaje testów mogą być programowane w ten sam sposób.

Adekwatna symulacja rzeczywistych obciążeń elementów maszyn umożliwia prowadzenie prac badawczych nad nowymi metodami przyspieszonych badań materiałów oraz predykcją czasu do uszkodzenia krytycznych elementów maszyn.

Otwartym pozostaje pytanie o stopień dekompozycji funkcji urządzenia na rozkazy podstawowe. Z jednej strony odzwierciedlają one fazy procesu pomiarowego, z drugiej strony ich zbiór jest skończony i wprowadzenie nowej funkcji podstawowej jest niemożliwe bez zmian oprogramowania modułu PLC. Dekompozycja do poziomu prostszych funkcji odpowiadających elementarnym funkcjom systemu sterowania może prowadzić do możliwości tworzenia innych rozkazów podstawowych w oprogramowaniu nadrzędnego komputera PC. Ograniczeniem są tu jednak opóźnienia wprowadzane przez połączenie sieciowe komputera i modułu PLC.

6. Literatura

- [1] Mandziej S. T.: Accelerated creep testing of new steels for power generation and chemical processing (Metal 2010).
- [2] Woodford D. A.: Accelerated Testing for High-Temperature Materials Performance and Remaining Life Assessment (EPRI, Palo Alto, CA: 1999, TR-114045).
- [3] Izaki T. et al.: International Journal of Pressure Vessels and Piping 86 (2009), p. 637.
- [4] Samborski T., Zbrowski A., Kozioł S., Majcher A.: Mechatroniczne stanowisko do badań zmęczeniowych. Energetyka, XXII (2011), s. 76.
- [5] WINCCS II Modular Retrofit Kit. Applied Test System, Butler PA.
- [6] WaveMatrix Software. Intelligent Software for Fatigue and Dynamic Testing. Instron, WB1253C.
- [7] Majcher A., Węglowski B., Ocloń P.: Multi-function device for creep testing at elevated temperature. International Conference on Frontiers of Mechanical Engineering, Materials and Energy, Beijing, 2012.
- [8] Godena G.: Proc-Graph: a procedure-oriented graphical notation for process-control software specification. Control Engineering Practice, 2004, 12, 99-111.
- [9] Staborski M.W.: Cyfrowe przyrządy pomiarowe. PWN, Warszawa 2002.
- [10] Yang S.H., Chen X., Alty J.L.: Design issues and implementation of internet-based process control systems. Control Engineering Practice, 2003, 11, 709-720.
- [11] Taler J., Węglowski B.: Monitoring of thermal stresses in pressure components of steam boilers, in Encyclopedia of Thermal Stresses ed. R. Hetnarski, Accepted for print.

otrzymano / received: 25.01.2013

przyjęto do druku / accepted: 01.03.2013

artykuł recenzowany / revised paper