

Michał PRAĆCIK

Politechnika Krakowska, Al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków

E-mail: pracik@mech.pk.edu.pl

Modelowanie i identyfikacja oddziaływań dynamicznych w próbie rozciągania przeprowadzanej w ciekłym helu

1 Wstęp

Problematyka badań wytrzymałości materiałów metalicznych (stali nierdzewnych, stopów Cu-OFE, nadprzewodników, stopów specjalnego przeznaczenia) w bardzo niskich temperaturach na przykład w ciekłym helu, jest rozwijana w niewielu polskich ośrodkach naukowych. Wyniki takich doświadczeń są ważne dla wielu dyscyplin, począwszy od energetyki atomowej i badań jądrowych, kosmonautyki, a kończąc na medycynie.

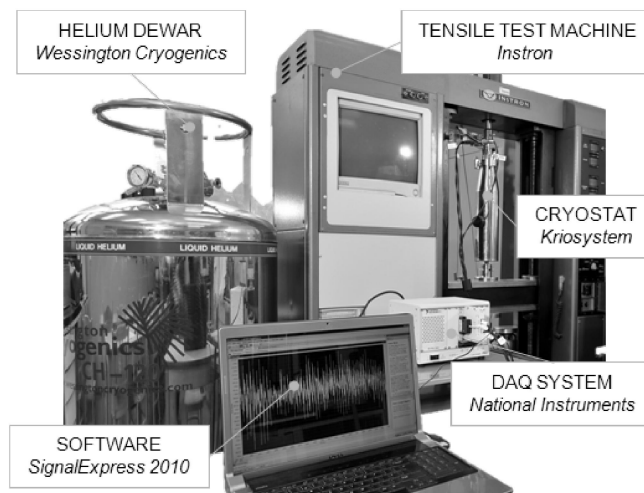
Studując literaturę światową [4, 9, 11], można znaleźć sprawozdania zawierające wyniki końcowe badań własności wytrzymałościowych stopów w warunkach kriogenicznych, ale rzadko są one uzupełnione informacjami odnoszącymi się do oszacowania dokładności metody przeprowadzania testów wytrzymałości i wpływów cech aparatury badawczej. Norma [7] ISO 19819 (Metallic materials. Tensile testing in liquid helium; 2004), dotycząca testów jednoosiowego rozciągania metali w temperaturze ciekłego helu, zaleca na przykład stosowanie do pomiarów odkształceń ekstensometrów typu *clip-on*. Nie istnieją jednak normy przedmiotowe ani nie są sformalizowane powszechnie akceptowalne procedury zapewnienia jakości badań (*Quality Assurance*) [2, 4], dotyczące warunków i aparatury do przeprowadzania prób wytrzymałościowych w temperaturach kilku kelwinów. Jest to powodem trudności w porównywaniu wyników doświadczeń w przypadkach, gdy na przykład w próbie rozciągania do pomiaru odkształceń stosuje się różne czujniki, raz ekstensometry [9], a według innej procedury czujniki indukcyjne typu LVDT [8] albo różne czujniki do pomiaru siły, maszyny wytrzymałościowe, odmienne uchwyty próbek. Właściwą interpretację wyników testów wytrzymałościowych ułatwiłoby doświadczalne określenie parametrów dynamicznych i wpływu różnych części całego stanowiska badawczego [1].

W szczególności ważne jest oszacowanie, jak częstości drgań własnych i własności sztywności elementów w torze pomiarowym i układzie zadawania wymuszenia wpływają na oscylacje związane z obserwowanym zjawiskiem nieciągłego płynięcia plastycznego [3], ujawniającym się w czasie próby rozciągania, realizowanej w warunkach kriogenicznych. Kompleksowe podejście do modelowania systemu: *czujniki – próbka – struktura stanowiska* powinno pozwolić na dokonanie niezbędnych predykcji za pomocą wirtualnego modelu, a wyniki symulacji przyczyniłyby się do ograniczenia liczby wymaganych eksperymentów.

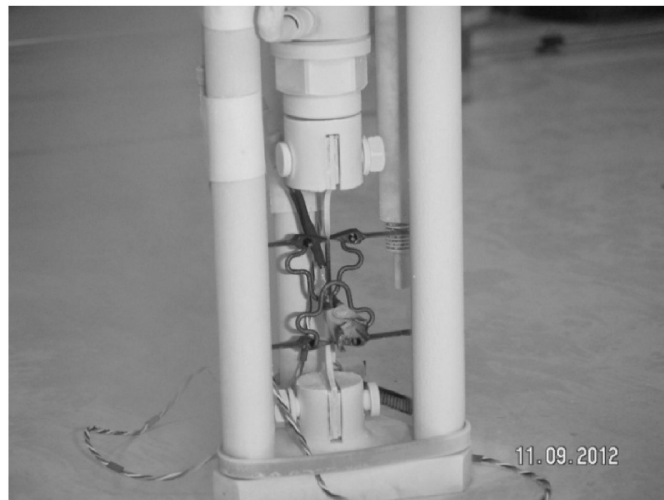
W pracy przedstawiono proponowany model struktury całego wspomnianego systemu. Zbudowane oryginalne programy symulacyjne bazują na danych katalogowych, parametrach konstrukcyjnych stanowiska oraz danych pomiarowych zebranych w trakcie doświadczeń własnych wykonanych w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Krakowskiej.

2 Badania doświadczalne

Celem badań doświadczalnych przeprowadzonych w Laboratorium Instytutu Mechaniki Stosowanej Politechniki Krakowskiej była identyfikacja funkcji charakteryzujących proces dynamicznego oddziaływania badanej próbki ze strukturą stanowiska badawczego podczas prób rozciągania dokonywanych w ciekłym helu. Fotografia na rysunku 1 przedstawia ogólnie budowę stanowiska, a fotografia na rysunku 2 ilustruje wewnętrzną konstrukcję trójkolumnowego zespołu obciążania, mocowania oraz pomiarów siły i odkształceń rozciąganej próbki. Zespół kolumn, uchwytów i czujników pokryty jest szronem po wyjęciu z wnętrza kriostatu.



Rys. 1. Stanowisko do testów jednoosiowego rozciągania w warunkach kriogenicznych
Fig. 1. The cryogenic stand for uniaxial tensile tests at ultra-low temperatures



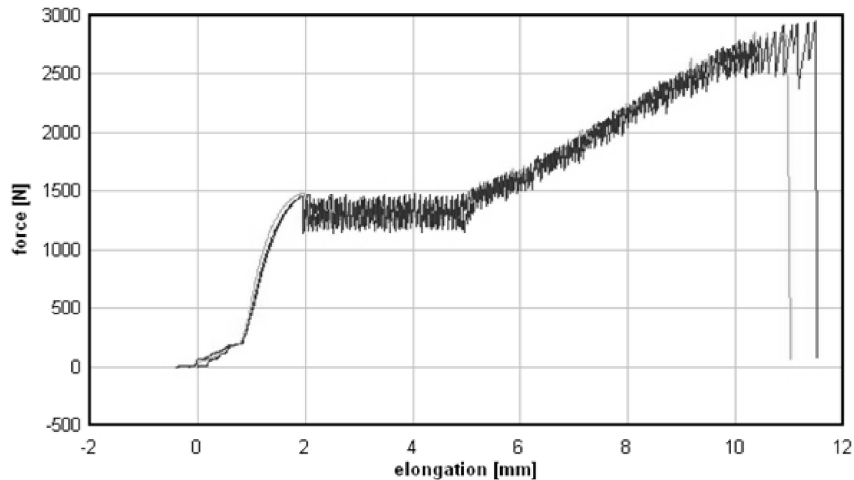
Rys. 2. Wewnętrzna trójkolumnowa struktura kriostatu z próbką, uchwytami, dualnymi ekstensometrami i czujnikiem siły

Fig. 2. Cryostat internal three-column structure with specimen holders and dual extensometers and force sensor

Badane były [8, 10] różne czynniki, które mogą wpływać na zjawisko nieciągłego płynięcia plastycznego, na jakość uzyskiwanych wyników w próbach rozciągania, przeprowadzanych w ciekłym helu, przy wymuszeniu kinematycznym. Analizowano na drodze doświadczalnej wpływ następujących czynników:

- materiał próbek, (304L, 316L, 316LN, 316Ti, stal nierdzewna),
- ukształtowanie próbek,
- dokładność wykonania próbek,
- sposób mocowania próbek,
- drgania własne czujników przemieszczeń,
- drgania samowzbudne wywołane zjawiskiem *cold welding* (tarcie szczepno-poślizgowe ostrzy ekstensometrów),
- zakłócenia rejestrowanych sygnałów pochodzące od maszyny wytrzymałościowej,
- sposób przetwarzania danych pomiarowych.

Złożony mechanizm zjawiska nieciągłego płynięcia plastycznego [3,12,13] jest zazwyczaj dokumentowany wykresem „siła – przemieszczenie końca próbki” albo „naprężenie – odkształcenie” próbki w postaci, jak ukazują to wyniki badań własnych na rysunku 3. Szczegółowo warunki, zakres i rezultaty tych badań eksperymentalnych zostały omówione w publikacjach [8] i [10].

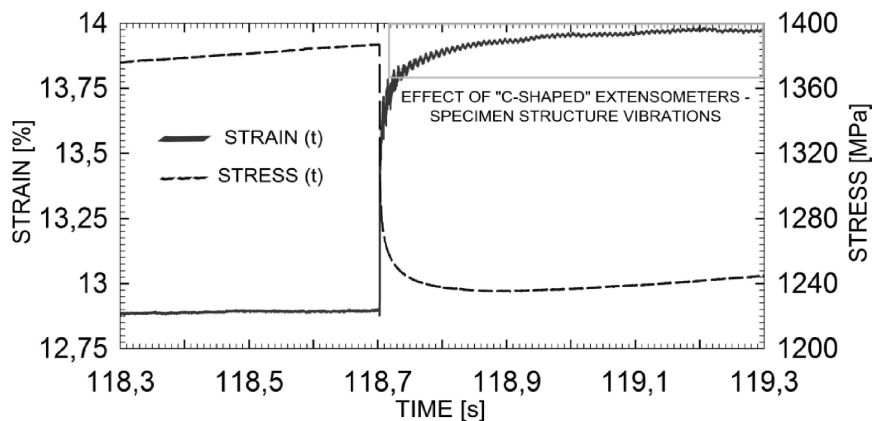


Rys. 3. Wyniki trzech testów rozciągania próbki ze stali nierdzewnej przeprowadzonych w temperaturze ciekłego helu [10]

Fig. 3. Comparison of three results of tensile tests of stainless steel at liquid helium [10]

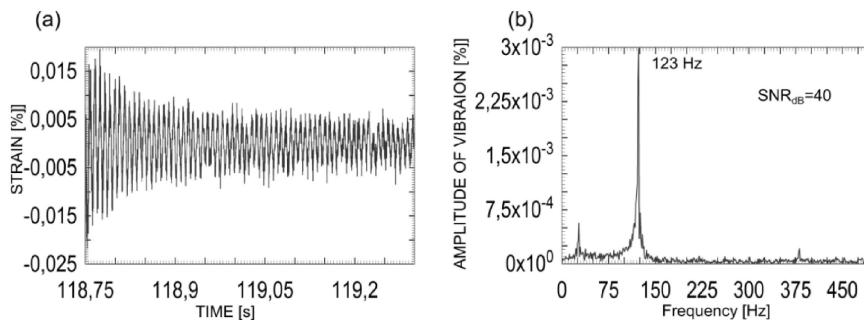
W rzeczywistości w trakcie doświadczeń rejestrowane są przebiegi czasowe siły rozciągania próbki za pomocą czujnika piezoelektrycznego oraz przebieg czasowy wydłużenia końca próbki za pomocą ekstensometrów albo czujnika LVDT. Wykresy typu „siła – przemieszczenie”, takie jak przedstawione na rysunku 3, nie odnoszą się jawnie do czasu. Dopiero analiza niewielkiego fragmentu zarejestrowanych przebiegów czasowych próby rozciągania (rys. 4 wg [10]) pozwala ujawnić wpływ charakterystyk dynamicznych czujników na przebieg procesu.

Zidentyfikowane metodą rezonansową [6] w trakcie odrębnych, wcześniejszych badań [10] częstości drgań własnych ekstensometrów typu „C” występują także wyraźnie w widmie FFT na rysunku 5, uzyskanym na podstawie analizy częstotliwościowej zaznaczonego wycinka z rysunku 4.



Rys. 4. Fragment zarejestrowanych odkształceń (strain) i naprężeń (stress) z próby rozciągania próbki ze stali nierdzewnej (w ciekłym helu) przedstawiony w tym samym odcinku czasu [10]

Fig. 4. A piece of strains and stresses recorded during tensile test of stainless steel at liquid helium, represented in the same time interval [10]



Rys. 5. Analiza zaznaczonego na rysunku 4 wycinka z wykresu przebiegu odkształceń pozwala zidentyfikować częstotliwość drgań własnych ekstensometrów

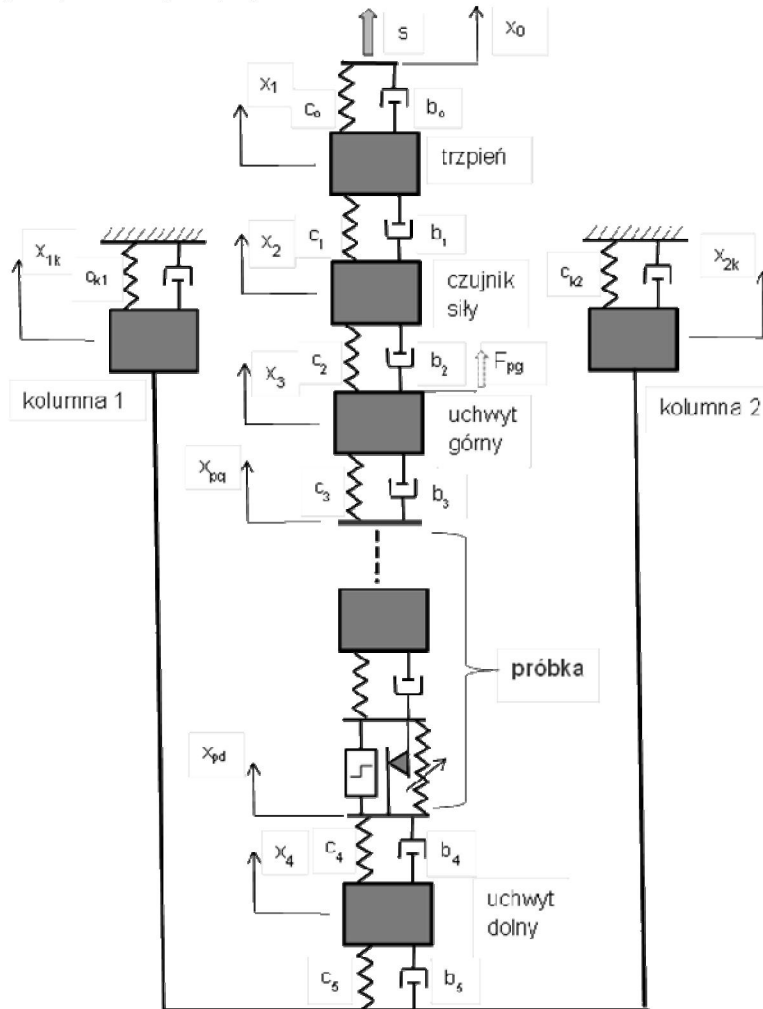
Fig. 5. Analysis of marked area of strain vs. time chart in the figure 4 allows identification of extensometers natural frequency

Wyniki analiz wpływu różnych czynników [8,10], jakie mogą wpływać na przebieg zjawiska nieciągłego płynięcia plastycznego próbek rozciąganych w ciekłym helu, uzasadniają celowość podjęcia tematu kompleksowego modelowania systemu czujniki – próbka – struktura stanowiska.

3 Model systemu czujniki – próbka – struktura stanowiska

Przyjęto model uproszczony części stanowiska - zespołu pomiarowego, umieszczonego w kriostacie, w postaci dyskretnego modelu dynamicznego o parametrach skupionych,

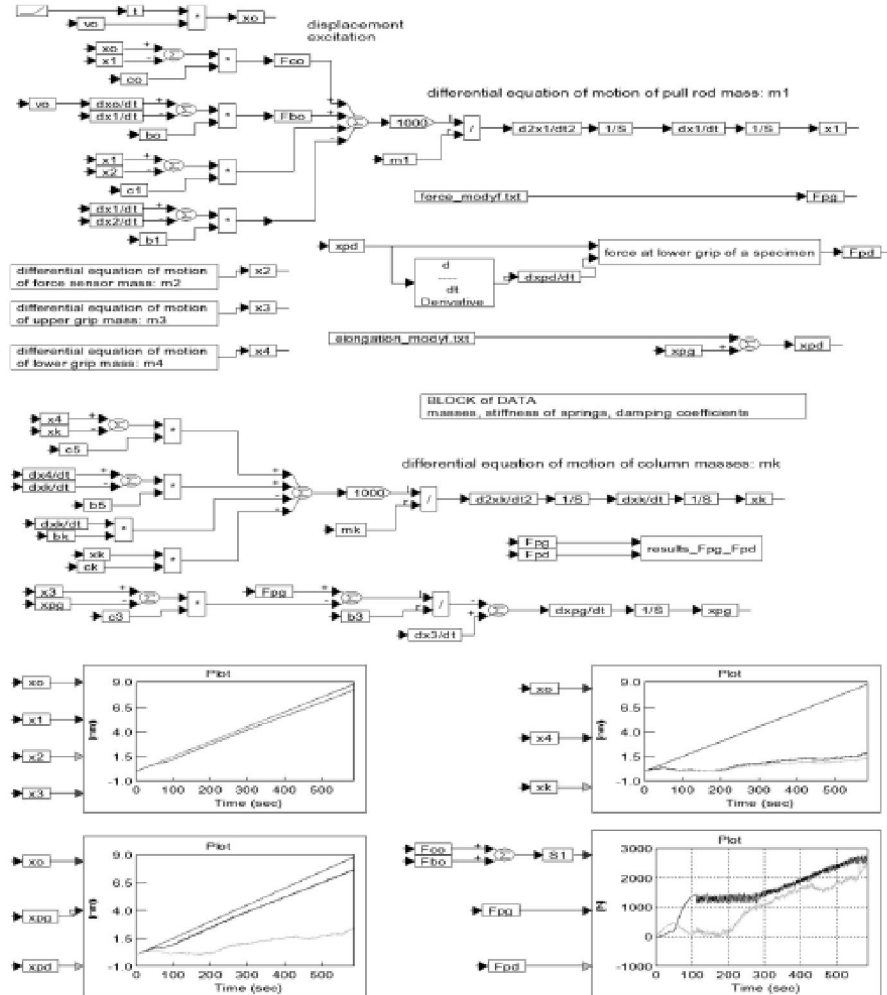
natomiast samą próbkę przedstawiono w postaci zależności uzyskanych na drodze fenomenologicznej: bieżąca siła rozciągania $F_{pg}(t)$ oraz bieżąca wartość mierzonego wydłużenia, równa różnicy przemieszczeń końcówek ekstensometru = $x_{pg}(t) - x_{pd}(t)$. Rysunek 6 przedstawia analizowany model z zaznaczonymi elementami zespołu i przypisanymi im współrzędnymi.



Rys. 6. Analizowany dyskretny model systemu przyjęty do symulacji numerycznych
 Fig. 6. Lumped mass model of system considered to numerical simulations

Standardowo zapisane, bazujące na II-giej zasadzie dynamiki Newtona, równania różniczkowe ruchu dla poszczególnych ciał o masie skupionej, reprezentujących elementy zespołu pomiarowego w kriostacie, uzupełniono dwoma związkami

zawierającymi dane pomiarowe o przebiegu w funkcji czasu (uzyskane w trakcie próby rozciągania): siły $F_{pg}(t)$ i wydłużenia próbki $elongation = x_{pg}(t) - x_{pd}(t)$. Na podstawie tak uzyskanego układu 7 równań różniczkowych zwyczajnych, z dołączonymi warunkami początkowymi i przy założonym kinematycznym wymuszeniu przemieszczeniowym („s” na rysunku 6) ze stałą prędkością nadawaną końcówce trzpienia, można było zbudować schemat blokowy w pakiecie symulacyjnym VisSim & Analyze [14], przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat blokowy symulacji rozwiązań układu równań różniczkowych ruchu elementów zespołu pomiarowego w kriostacie

Fig. 7. Scheme of simulation blocks for solution of system of differential equations of motion of measurement system elements mounted inside cryostat

4 Wyniki symulacji

Posługując się programem ukazanym na rysunku 7, w którego bloku danych można wprowadzać stopniowo zmieniane parametry sztywności i tłumienia charakteryzujące poszczególne elementy zespołu pomiarowego oraz wykorzystując dane pomiarowe z prób rozciągania prowadzonych w różnych warunkach wymuszenia kinematycznego dla różnych próbek, możliwe stało się numeryczne, symulacyjne zbadanie wrażliwości zjawiska nieciągłego płynięcia plastycznego na zmianę parametrów konstrukcji samego stanowiska. Jako wskaźnik wrażliwości przyjmowano na przykład różnicowanie widma częstotliwości występowania tzw. seracji, czyli skoków – zrywania ciągłości przebiegów zmian przemieszczeń w czasie procesu rozciągania próbki w helu, rejestrowanych ekstensometrami.

5 Wnioski i uwagi końcowe

Znajomość widma częstotliwości drgań własnych układu: *czujniki – próbka – elementy mocujące*, uzyskana w wyniku analizy danych z prób rozciągania w niskich temperaturach oraz spektrum drgań otrzymanego, jako odpowiedź na wymuszenie uderzeniem (bez rozciągania), pozwala oszacować wpływ częstości drgań własnych ekstensometru na wyniki próby rozciągania.

Zidentyfikowane parametry konstrukcyjne i modalne elementów zespołu pomiarowego kriostatu są podstawą do budowy modelu wirtualnego uwzględniającego wpływ tych elementów toru i struktury stanowiska na rezultaty próby rozciągania.

Za pomocą symulacji numerycznych można analizować wrażliwość zaproponowanego modelu na zmiany parametrów: sztywności i współczynników tłumienia wewnętrznego, poszczególnych elementów stanowiska.

Wykonane symulacje numeryczne na zbudowanym systemowym modelu zespołu pomiarowego stanowiska pozwoliły dodatkowo stwierdzić, że wygładzanie uśredniające zbioru danych (kompresja; decymacja) i następująca po tym operacja dekompresji – wyrównywanie kroku czasowego i zwiększanie częstotliwości repróbkiowania – prowadzą do uwypuklenia (zmniejszenia rozmycia) częstotliwości w widmie FFT, prezentującym nieciągłe płynięcie (seracje).

Literatura

1. Albright J.: Dynamic Strain Measurement. In: Dyson BF, Loveday MS, Gee MG. *Materials metrology and standards for structural performance*, pp. 115-133, Chapman and Hall, 1995
2. ASTM E 1450-03. Standard test method for tension testing of structural alloys in liquid helium. *Annual Book of ASTM Standards*, 01.03. 2005
3. Bielski J., Skoczeń B.: Multiscale constitutive model of plastic flow discontinuities at extremely low temperatures, in: *Proceedings of XXIII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics ICTAM'12*, Beijing, China, 19-24 August 2012
4. Davis JR.: Tensile testing at low temperature. In: *Tensile testing*. 2nd ed. ASM International, pp. 245-246, 2004

5. Egner H., Ryś M.: Modelowanie sprzężenia pomiędzy rozwojem uszkodzeń i przemianą fazową w stali austenitycznej w warunkach temperatur kriogenicznych, *Czasopismo Techniczne* 8-M/2012, 27-44
6. Gade S., Herlufsen H., Konstantin-Hansen H.: How to Determine the Modal Parameters of Simple Structures. *Sound & Vibration*, 36 (1), pp. 72-73, 2002
7. ISO 19819 *Metallic materials. Tensile testing in liquid helium*, 2004
8. Marcinek D. J., Skoczeń B., Sgobba S.: Constitutive modelling and experimental study of discontinuous plastic flow in 316LN and JK2LB steels at very low temperature, *Proceedings of 3rd International Conference on Material Modelling (ICMM)*, incorporating the 13th European Mechanics of Materials Conference, eds. P. Dłużewski, G. Jurczak, T. D. Young, IPPT PAN, Warsaw, Poland, 2013
9. Nyilas A.: Transducers for sub-micron displacement measurements at cryogenic temperatures. *Advances in Cryogenic Engineering*, 52: 27-34, 2006
10. Prącik M., Tabin J.: Cryogenics and tensile test modeling, *materiały XIII Sympozjum „Wpływ wibracji na otoczenie”*, Wiśnicz, 25-28 września 2013; artykuł rekomendowany przez Komitet Naukowy Sympozjum do *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*
11. Reed R.P., Mikesell R.P.: Low-temperature (295 to 4 K) mechanical properties of selected copper alloys. *Journal of Materials*, 2(2), pp. 373-374, 1967
12. Skoczeń B., Bielski J., Sgobba S., Marcinek D.: Constitutive Model of Discontinuous Plastic Flow at Cryogenic Temperature. *International Journal of Plasticity* (26) pp. 1659-1679, 2010
13. Skoczeń B.: *Discontinuous yielding at cryogenic temperatures*, ETS Encyclopedia of Thermal Stresses, monografia. Editor: R. Hetnarski, Springer, 2014
14. VisSim & Analyze Professional ACADPRGM-AP serial No. 8052

Streszczenie

W pracy przedstawiono proponowany model struktury systemu: czujniki – próbka – struktura stanowiska. Zbudowane oryginalne programy symulacyjne bazują na danych konstrukcyjnych i pomiarowych uzyskanych podczas doświadczeń przeprowadzonych w Instytucie Mechaniki Stosowanej Politechniki Krakowskiej. Dane te pozwalają identyfikować parametry i opisywać funkcje charakteryzujące proces dynamicznego oddziaływania próbki rozciąganej w ciekłym helu ze strukturą stanowiska badawczego.

Słowa kluczowe: kriogenika, modelowanie, symulacja

Modelling and identification of dynamic interactions at tensile tests at liquid helium

Summary

In the paper the model of proposed structure of system: *sensors – specimen- stand structure* is presented. Simulation programs are built basing under construction and measurement data obtained from experiments carried out on the standup at Institute of Applied Mechanics at Cracow University of Technology. These data allow to identify model parameters and to describe functions that characterize process of dynamic interactions between the tension specimen and the standup structure, at liquid helium.

Keywords: cryogenics, modelling, simulation

Artykuł sfinansowany w ramach projektu badawczego nr 2284/B/T02/2011/40.