

ANALIZA EKSPERYMENTALNA KRZYWYCH UMOCNIEŃ SPIEKÓW CIĘŻKICH PRZY ZASTOSOWANIU RÓŻNYCH SZYBKOŚCI ODKSZTAŁCENIA I SPOSOBÓW OBCIĄŻENIA

W pracy omówione zostały rezultaty eksperymentalnych badań dynamicznych spieku 90W-7Ni-3Fe otrzymanego dwoma sposobami: w procesie konwencjonalnym i z wykorzystaniem spiekania rezystancyjnego. Przedstawiono uproszczone wykresy krzywych umocnienia poza zakresem liniowej sprężystości badanego materiału, które w wystarczającym przybliżeniu uwzględniają rzeczywiste związki naprężenie-odkształcenie w szerokim zakresie szybkości odkształcenia. Umożliwiło to uzyskanie empirycznego modelu materiału sprężysto/lepkoplastycznego ze wzmocnieniem liniowym.

1. Wprowadzenie

Warunki eksploatacji materiałów stosowanych w technice uzbrojenia często związane są z dużymi deformacjami, przy bardzo wysokich szybkościach odkształcenia i w warunkach wysokiej temperatury. Współczesne modele obliczeniowe materiałów konstrukcyjnych opisują ich zachowanie się w zakresie pozasprężystym, z uwzględnieniem szybkości odkształcenia, wpływu temperatury, anizotropii odkształcenia i innych czynników. W procesie budowy modeli materiału, zarówno empirycznych, jak i opartych na podstawach fizycznych, konieczna jest analiza eksperymentalna dynamicznego zachowania się konkretnych materiałów konstrukcyjnych [1]. Uzyskane z tych badań krzywe umocnienia są niezbędne do dalszego matematycznego opisu zachowania się ciała - dla przyjętej zależności konstytutywnej. Postęp inżynierii materiałowej stwarza obecnie duże możliwości otrzymywania materiałów konstrukcyjnych posiadających właściwości pożądane w technice uzbrojenia, w tym również w zastosowaniu do rdzeni pocisków przeciwpancernych. Można zaliczyć do nich m. in. spieki ciężkie, będące kompozytami składającymi się głównie z wolframu z dodatkiem takich metali, jak: Fe, Ni, Co, Cu, Re i in. Dla tych materiałów konieczne jest wyznaczenie dynamicznych charakterystyk wytrzymałościowych, zwłaszcza w zakresie dużych szybkości odkształcenia, przy czym badania prowadzi się często w szerokim zakresie odkształcenia - do zniszczenia próbki badanego materiału. Na podstawie uzyskanej na drodze eksperymentalnej zależności „naprężenie - odkształcenie - szybkość odkształcenia” można, dla badanych spieków, w pewnym przybliżeniu, przewidywać ich właściwości użytkowe.

Celem niniejszej pracy była dalsza analiza eksperymentalna krzywych umocnienia spieków W-Ni-Fe otrzymanych w procesach konwencjonalnych i z wykorzystaniem spiekania rezystancyjnego poddanych statycznym i dynamicznym próbom ściskania [2 ÷ 5]. Badania dynamiczne zostały przeprowadzone w zakresie dużych i bardzo dużych szybkości odkształcenia. Próbki spieków poddano ściskaniu w temperaturze pokojowej przy zastosowaniu trzech różnych warunków obciążenia. Badania quasi-statyczne wykonano na standardowej maszynie wytrzymałościowej, zaś badania quasi-dynamiczne – na adaptowanym do tego celu młocie Charpy’ego z wykorzystaniem zaprojektowanego układu obciążającego. Badania dynamiczne w zakresie szybkości odkształcenia do 10^4 s^{-1} zrealizowano metodą zmodyfikowanego (dzielonego) pręta Hopkinsona [6]. Eksperymenty fizyczne przy bardzo dużych szybkościach odkształcenia dochodzących do wartości $2 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$ wykonano metodą bezpośredniego uderzenia prętem obciążającym w badaną próbkę materiału [7]. Powyższe badania umożliwiły doświadczalne ustalenie związków między rzeczywistym naprężeniem i odkształceniem. Są to wielkości koniugowane poprzez pracę w ujęciu standardowej terminologii nieliniowej mechaniki ośrodków ciągłych w zakresie dużych odkształceń [8]. Następnie dokonano tzw. schematyzacji wykresów rzeczywistych, uzyskując biliniowe modele ciała sprężysto-plastycznego [9]: prawo Hooke’a w zakresie odkształceń sprężystych i wzmocnienie liniowe po osiągnięciu stanu plastycznego (początkowej granicy plastyczności). Mimo tych daleko posuniętych uproszczeń w stosunku do krzywych eksperymentalnych, przytoczony model można zastosować z powodzeniem w wielu zagadnieniach technicznych, w tym związanych z techniką uzbrojenia. Na zakończenie pracy przedstawiono w postaci wykresów wpływ szybkości odkształcenia na początkową granicę plastyczności badanych spieków. Jest to niezbędne dla wprowadzenia odpowiednich wielkości do modelu ciała lepkoplastycznego w celu uzyskania współczynnika lepkości materiału [10]. Będzie to przedmiotem dalszej pracy autorów.

2. Badania eksperymentalne

1.1 Przygotowanie próbek spieków

Spieki W-Ni-Fe, wykazują wysokie właściwości mechaniczne takie, jak wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, twardość i udarność, plastyczność (duże wydłużenie i przewężenie) [11]. Te cechy materiału są szczególnie korzystne w przypadku konstruowania rdzeni do pocisków przeciwpancernych. Zdolności penetracyjne takich rdzeni znacznie przewyższają parametry uzyskiwane np. przez rdzenie wolframowe i stalowe.

W niniejszej pracy badaniom poddano spiek 90W-7Ni-3Fe. Materiał ten wykonano przy zastosowaniu trzech wariantów technologii wytwarzania, obejmujących procesy przy wykorzystaniu metody konwencjonalnej (spiekanie końcowe w piecu oporowym) oraz rezystancyjnej:

a) **proces konwencjonalny** (oznaczenie procesu i próbek - **A**) obejmujący następujące operacje: mieszanie proszków metali z ujednorodnieniem, prasowanie izostatyczne na zimno pod ciśnieniem 300 MPa, spiekanie wstępne w atmosferze zdysocjowanego NH_3 w temperaturze do 1180°C w ciągu 2 godzin, spiekanie z fazą ciekłą w próżni w temperaturze 1480°C w ciągu 0,5 godziny,

b) **proces konwencjonalny (B)**: jak proces A, lecz spiekanie z fazą ciekłą w atmosferze argonu,

c) **proces spiekania rezystancyjnego (C)**: jak proces A, lecz spiekanie rezystancyjne z fazą ciekłą w atmosferze argonu w temperaturze 1480°C w ciągu 5 minut.

Proces A został opracowany w Wojskowej Akademii Technicznej [12]. Proces B zastosowano dla dokonania bardziej miarodajnego porównania metody konwencjonalnej z metodą rezystancyjną, ze względu za zastosowaną atmosferę spiekania (argon).

2.2 Badania statyczne i dynamiczne

W celu uzyskania informacji o właściwościach mechanicznych badanych spieków odkształcanych statycznie i dynamicznie w szerokim zakresie szybkości odkształcenia przeprowadzono próby ściskania próbek walcowych na następujących stanowiskach badawczych: standardowej maszynie wytrzymałościowej (EDZ 20) (fot. 1), młocie Charpy'ego prod. firmy Heckert ze specjalnie zaprojektowanym układem obciążającym, a także układem rejestrującym obciążenie i skrócenie badanych próbek (fot. 2) oraz na zmodyfikowanym (dzielonym) pręcie Hopkinsona (SHPB) – fot. 3. Szczegółowy opis analizy eksperymentalnej przeprowadzanej z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona do prób na ściskanie i interpretacja wyników badań doświadczalnych ciężkich spieków zostały przedyskutowane w poprzednich publikacjach autorów [2 ÷ 5]. Warto w tym miejscu nadmienić, że badania materiałów na ściskanie zarówno statyczne, jak i dynamiczne nie nadają się do określania modułu sprężystości podłużnej (modułu Younga). Ten parametr należy wyznaczać z prób rozciągania. W badaniach statycznych pomiar modułu Younga dokonuje się metodą Förstera [13].



Fot. 1. Maszyna do badań wytrzymałościowych EDZ 20



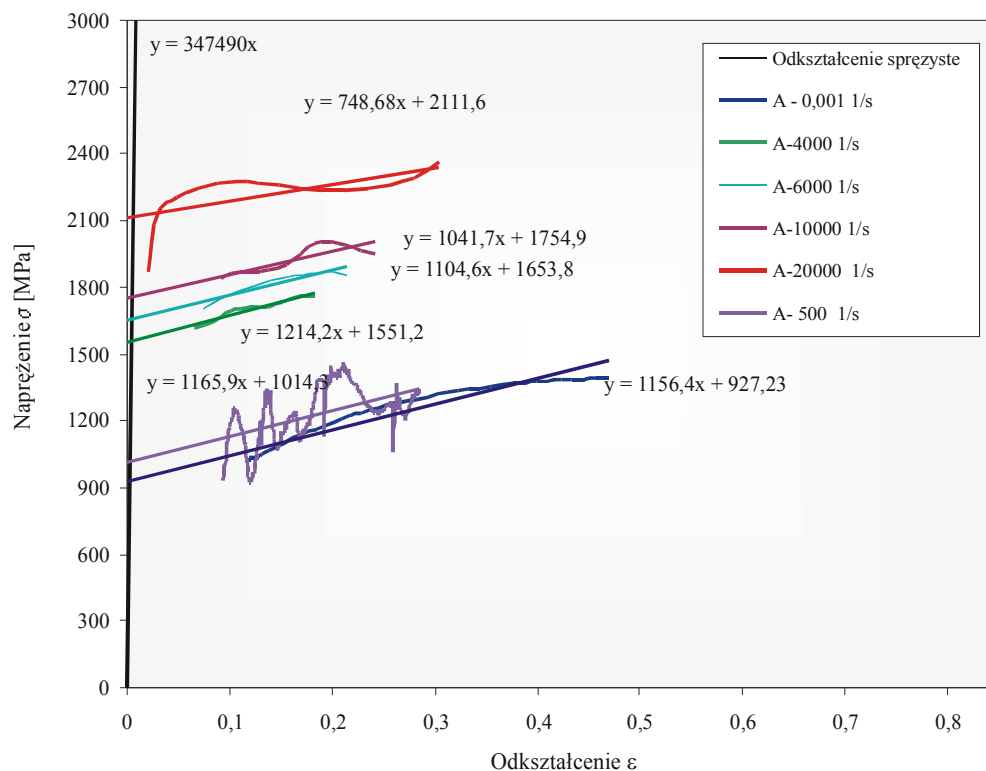
Fot. 2. Stanowisko do badań dynamicznego ściskania na bazie młota Charpy'ego



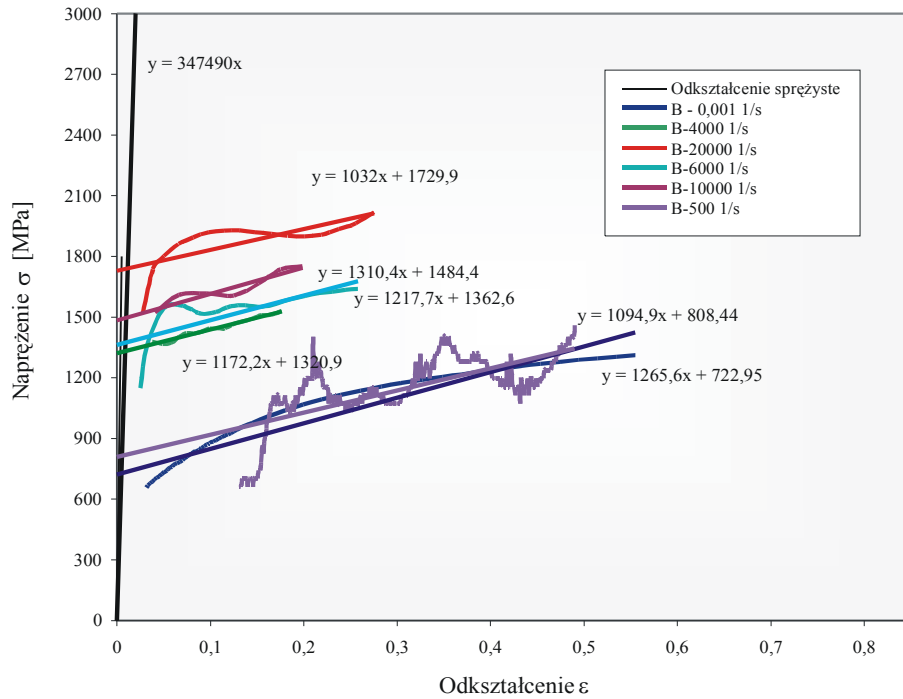
Fot. 3. Stanowisko badawcze – dzielone pręty Hopkinsona na ściskanie o średnicy prętów pomiarowych 10 mm (dolne urządzenie) i 20 mm (górne urządzenie). Na fotografii, po lewej stronie widoczne są wyrzutnie pneumatyczne wraz z lufami, zaś po prawej stronie układ do rejestracji i obróbki elektronicznych sygnałów otrzymanych z pomiarów

3. Wyniki badań

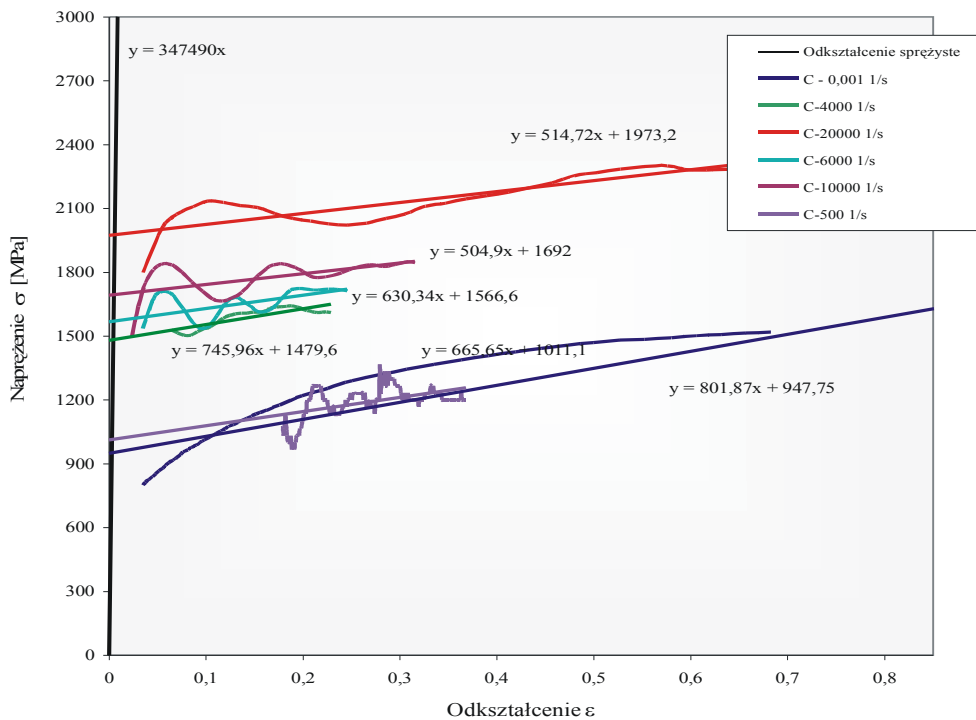
W każdym eksperymencie dynamicznym, wykonywanym przy zastosowaniu pręta Hopkinsona, rejestrowano szybkość odkształcenia i naprężenie rzeczywiste w funkcji czasu. Z kolei w pozostałych badaniach (quasi-statycznych i quasi-dynamicznych) średnią szybkość odkształcenia w każdej próbie wyznaczano z zależności: $\dot{\epsilon} = v/L_0$, gdzie v jest prędkością przemieszczania trawersu maszyny wytrzymałościowej lub bijaka młota Charpy'ego, L_0 - początkową długością próbki. Następnie otrzymane wykresy zależności eksperymentalnych naprężenie-odkształcenie uproszczono przez tzw. schematyzację w celu otrzymania biliniowego modelu ciała sprężysto-plastycznego. Uproszczone zależności krzywych umocnienia spieków badanych różnymi metodami eksperymentalnymi przedstawiono na rysunkach 1 – 3. Przy oznaczeniach próbek podano średnie wartości szybkości odkształcenia. Na rysunkach podano również wzory równań liniowych dla prawa Hooke'a oraz praw wiążących naprężenie z odkształceniem w zakresie odkształceń plastycznych dla różnych szybkości odkształcenia.



Rys. 1. Uproszczone zależności naprężenie-odkształcenie dla próbek A odkształcanych z różnymi szybkościami

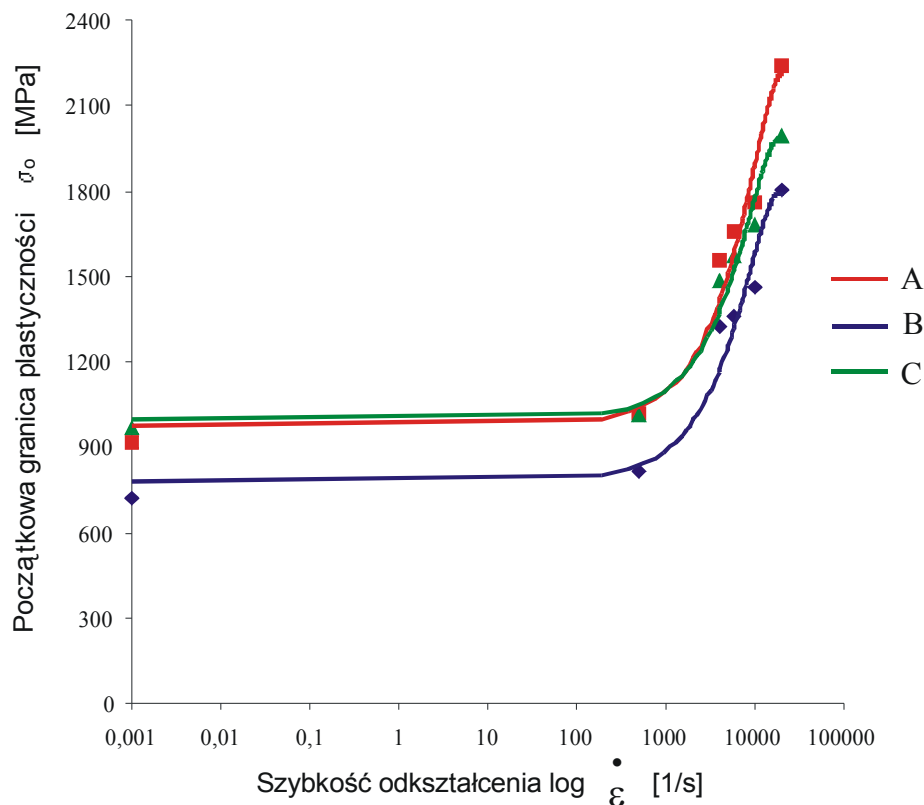


Rys. 2. Uproszczone zależności naprężenie-odkształcenie dla próbek B odkształcanych z różnymi szybkościami



Rys. 3. Uproszczone zależności naprężenie-odkształcenie dla próbek C odkształcanych z różnymi szybkościami

Na rys. 4 przedstawiono zależność granicy plastyczności badanych spieków od szybkości odkształcenia. Wykresy te wykonano na podstawie biliniowych modeli odkształcenia, zamieszczonych na poprzednich rysunkach.



Rys. 4. Wpływ szybkości odkształcenia na początkową granicę plastyczności

Na podstawie otrzymanych zależności można wyciągnąć następujące wnioski:

- próbki A i C zachowują się w sposób podobny w zakresie niskich szybkości odkształcenia, natomiast próbki B wykazują w rozpatrywanym przedziale szybkości odkształcenia znacznie niższe wartości granicy plastyczności,
- badane materiały nie są wrażliwe na szybkość odkształcenia w zakresie obciążeń statycznych i quasidynamicznych,
- materiały te są bardzo wrażliwe na duże szybkości odkształcenia powyżej 100 1/s.

Otrzymane krzywe doświadczalne: σ_0 – szybkość odkształcenia będą aproksymowane, w następnym etapie badań w procesie modelowania konstytutywnego, za pomocą funkcji wykładniczej lub potęgowej dla uzyskania funkcji naprężeń plastycznych w obszarze niesprężystym w modelu Perzyny.

4. Podsumowanie

Zaprezentowana analiza eksperymentalna rezultatów statycznych, quasidynamicznych i dynamicznych eksperymentów fizycznych umożliwiła uzyskanie empirycznego biliniowego modelu ciała sprężysto-plastycznego z liniowym wzmocnieniem i doświadczalnym prawem wpływu szybkości odkształcenia na

początkową granicę plastyczności badanych spieków. Stanowi to podstawę do dalszego modelowania dynamicznego odkształcania ciężkich spieków jako materiału sprężysto/lepkoplastycznego.

Niniejsza praca powstała w ramach realizacji projektu badawczego KBN nr 4 T08A 015 22 pt. „Badania spieków W-Ni-Fe wykonanych metodą rezystancyjną odkształcanych statycznie i dynamicznie”.

Literatura

1. Klepaczek J. R., Kruszka L., Review of constitutive relations for metals within wide range of strains, strain rates and temperatures, Technical Report No. 1/94/LPMM, Metz University, December 1994.
2. Majewski T., Przetakiewicz W., Kruszka L., Badanie własności dynamicznych spieków W-Ni-Fe wykonanych metodą tradycyjną i rezystancyjną, *Problemy Techniki Uzbrojenia*, zeszyt 79, Nr 4/2001, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, s. 109-114.
3. Kruszka L., Majewski T., Przetakiewicz W., Bragow A., Łomunow A., Statyczne i dynamiczne badania wytrzymałościowe spieków W-Ni-Fe, *Biuletyn WAT*, Nr 05(LII)/2003, s. 37-53.
4. Majewski T., Kruszka L., Gieleta R., Przetakiewicz W., Statyczne i dynamiczne właściwości wytrzymałościowe spieków W-Ni-Fe stosowanych w uzbrojeniu, XII Konferencja Naukowo-Techniczna nt.: *Problemy rozwoju, produkcji i eksploatacji techniki uzbrojenia*. Materiały – część I, Rynia, maj 2003 r., *Problemy Techniki Uzbrojenia*, zeszyt 86, Nr 1/2003, Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia, s. 147-155.
5. Kruszka L., Majewski T., Badania zachowania się spieków ciężkich podczas próby dynamicznego ściskania, Vth International Armament Conference *Scientific Aspects of Armament Technology*, Waplewo, Poland, October, 6 – 8, 2004, Abstracts, p. 60–61 and CD-ROM Proceedings, pp. 475-482 (ISBN 83-921491-0-6).
6. Kruszka L., Nowacki W. K., New applications of the Hopkinson pressure bar technique to determining dynamic behaviour of materials, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, 2, 34, 1996, pp. 259–280.
7. Bragov A. M., Demenko P. V., Lomunov A. K., Sergeichev I. V., Kruszka L., Investigation of behavior of the materials of different physical nature using the Kolsky method and its modifications, (Chapter 9.1), in: *New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact*, W. K. Nowacki and J. R. Klepaczek Eds., Series: Trends in Mechanics of Materials. Volume 3, Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures, Polish Academy of Sciences, Warsaw, 2001, pp. 337–348.
8. Ziółkowski A., Kruszka L., Test prostego ścinania przy identyfikacji własności materiałów sprężystych poddanych dużym deformacjom, 21st Symposium on Experimental Mechanics of Solids, Jachranka, Poland, October 13-16, 2004, p. 109.
9. Dyląg Z., Jakubowicz A., Orłoś Z., Wytrzymałość materiałów, WNT Warszawa, 1996, t.I.

10. Perzyna P., Teoria lepkoplastyczności, PWN Warszawa, 1966.
11. Majewski T., Analiza wpływu parametrów spiekania rezystancyjnego na strukturę i właściwości spieków W-Ni-Fe, Rozprawa doktorska, WAT Warszawa, 2000.
12. Włodarczyk E., Jackowski A., Michałowski J., Piętaszewski J., Malinowski S., „Zależność właściwości spieków ciężkich z osnową wolframową od parametrów prasowania i rodzaju mieszanek proszkowych”, Biuletyn WAT, XLIX, nr 12, 2000r., s.81-105.
13. Buch A., Własności mechaniczne czystych metali, WNT, Warszawa, 1968.