

DYNAMICZNE ROZCIĄGANIE PRÓBEK METALOWYCH PRZY UŻYCIU MŁOTA ROTACYJNEGO

ANDRZEJ TOBOTA, JANUSZ KLEPACZKO, JERZY GRONOSTAJSKI,
(WROCLAW, WARSZAWA, WROCLAW)

I. Wstęp

Rezultaty badań doświadczalnych dotyczące własności metali odkształcanych z dużymi prędkościami wskazują, że podstawową przyczyną różnic w zachowaniu się metali podczas dynamicznego i statycznego obciążania jest czułość materiału na prędkość odkształcenia. Zjawisko to jest intensywnie badane od szeregu lat, a zainteresowanie nim wynika zasadniczo z dwóch przyczyn. Z jednej strony znajomość własności plastycznych metali ma podstawowe znaczenie dla analizy procesów obróbki plastycznej, w których odkształcenie materiału odbywa się z podwyższonymi lub dużymi prędkościami. Z drugiej natomiast strony badania takie posiadają istotne znaczenie poznawcze, przyczyniając się do głębszego zrozumienia zjawisk fizycznych, zachodzących w odkształcanym materiale.

Uzyskiwanie informacji o własnościach plastycznych metali odkształcanych w bardzo krótkich przedziałach czasu stanowi poważny problem techniczny. Wynika to z wielu trudności w technice eksperymentu spowodowanych krótkotrwałością zjawisk oraz koniecznością stosowania specjalnych metod badawczych i elektronicznej aparatury pomiarowej. Stąd większość badań w tym zakresie przeprowadza się przy prostych schematach obciążeń, jakie występują w próbach rozciągania, ściskania, skręcania i prostego ścinania.

O ile wśród metod dynamicznego ściskania technikę zmodyfikowanego pręta Hopkinsona można traktować jako próbę najbardziej rozpowszechnioną w skali światowej [1, 2], to w przypadku prób dynamicznego rozciągania trudno jest wyróżnić jakąkolwiek dominującą metodę. Niewątpliwie próba jednoosiowego dynamicznego rozciągania próbek zarówno walcowych jak i płaskich jest jednym z ważniejszych sposobów badań własności plastycznych materiałów. Odgrywa ona bowiem identyczną rolę jak próba rozciągania dla obciążeń statycznych.

Dynamiczna próba rozciągania jest jedną z najwcześniej wprowadzonych i stosowanych. Dotychczas w literaturze opisano szereg urządzeń przy użyciu których jest ona realizowana. Ze względu na rodzaj wykorzystywanej w nich energii, urządzenia te można podzielić na dwie grupy. Są to:

1. Urządzenia wykorzystujące energię kinetyczną dużej masy, która z określoną prędkością uderza w koniec próbki, podczas gdy drugi jej koniec jest utwierdzony. Stosuje się tu takie urządzenia jak: młoty wahadłowe ($0,5 \text{ ms}^{-1} < v < 5 \text{ ms}^{-1}$) [3,4], młoty

spadowe ($1,0 \text{ ms}^{-1} < v < 10 \text{ ms}^{-1}$) [5,6] oraz młoty rotacyjne ($1,0 \text{ ms}^{-1} < v < 50 \text{ ms}^{-1}$). Dla poszczególnych urządzeń podano orientacyjne granice prędkości wymuszenia mechanicznego v (prędkości uderzenia).

2. Urządzenia wykorzystujące energię potencjalną ośrodka pośredniczącego (ciśnienie powietrza, wody lub produktów spalania), która jest przekazywana zazwyczaj na tłok poruszający koniec próbki. Można tu wymienić prace [7] i [8].

Omówienie problemów konstrukcyjnych i pomiarowych spotykanych w wymienionych urządzeniach, za wyjątkiem młota rotacyjnego, wykracza poza ramy niniejszej pracy. Niektóre z nich zostały przedyskutowane w podanych wyżej opracowaniach.

Stosowanie młotów rotacyjnych rozpoczęto stosunkowo dawno. Pierwsze konstrukcje datują się z lat trzydziestych [9], jednak pozbawione były one elektronicznej techniki pomiarowej. W badaniach określano jedynie pracę odkształcenia plastycznego próbki w funkcji prędkości wymuszenia mechanicznego.

Jedną z pierwszych konstrukcji, w której zastosowano pomiary elektroniczne, jest urządzenie opisane w pracy [10]. Do pomiaru siły rozciągania zastosowano dynamometr z fotokomórką, dla rejestracji przemieszczenia jednego z uchwytów próbki użyto również fotokomórki. Przebiegi siły w funkcji przemieszczenia fotografowano na oscyloskopie katodowym. Niektóre wyniki uzyskane przy użyciu tego urządzenia przedstawiono w pracy [11].

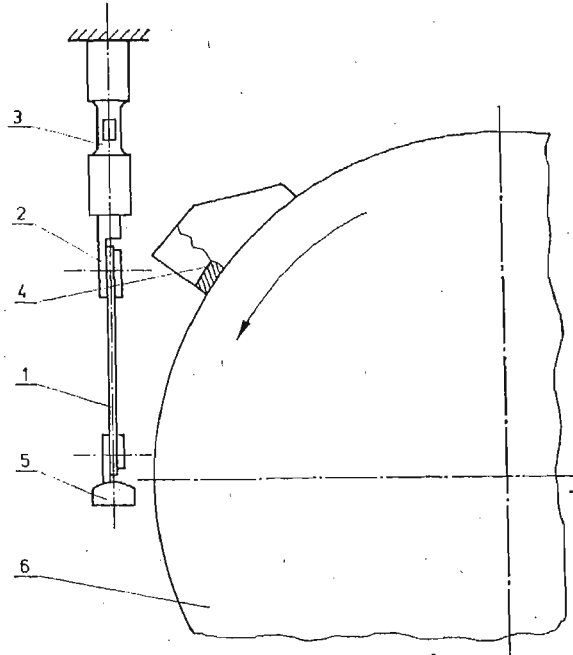
Obecnie młoty rotacyjne typu RSO produkcji WPM Lipsk są rozpowszechnione w wielu krajowych laboratoriach. W urządzeniach tych stosuje się system pomiaru siły czujnikami piezokwarcowymi, a w pomiarze przemieszczeń wykorzystuje się fotokomórkę. Niewielkie zainteresowanie młotami typu RSO do wyznaczania dynamicznych krzywych umocnienia jest spowodowane, jak się wydaje, zastosowanym systemem pomiaru siły, który znacznie utrudnia prawidłową interpretację uzyskiwanych wyników.

Z uwagi na brak bardziej szczegółowych analiz dotyczących tego zagadnienia, podjęto badania na urządzeniu wspomnianego typu, dokonując odpowiednich usprawnień systemu pomiarowego siły oraz wskazując sposób interpretacji otrzymywanych oscylogramów.

2. Zasada działania urządzenia i zastosowane metody pomiarowe

Schemat rozciągania próbek przy użyciu młota rotacyjnego przedstawiony jest na rys. 1. Rozciągana próbka 1 jest zamocowana w nieruchomym uchwycie 2, który połączony jest szeregowo z dynamometrem 3. Drugi koniec próbki, do którego przymocowano kowadło dolnego uchwytu 5, po uderzeniu przez pazur 4, porusza się z odpowiednio dużą prędkością v . Próbka poddawana jest rozciąganiu jedynie po zazębieniu kowadła z pazurem, który jest zamocowany na kole udarowym 6. Pazur zwalniany jest przez czujnik elektromagnetyczny przez określonej prędkości obrotowej koła zamachowego młota. Prędkość uderzenia v w dynamicznej próbie rozciągania posiada bardzo istotne znaczenie, bowiem stanowi podstawę przy określaniu prędkości odkształcenia. Stwierdzono, że pomiar prędkości za pomocą zainstalowanego fabrycznie w młocie rotacyjnym miernika prędkości, obciążony jest dość znacznym błędem. Wobec tego podjęto próbę wyznaczenia prędkości v inną metodą. W tym celu wykorzystano fotokomórkę,

która jest zamocowana nieruchomo do korpusu młota. Przesłona przytwierdzona do wału koła udarowego, obracając się wraz z nim, przecina przy każdym obrocie koła padający na fotokomórkę strumień światła. Impulsy z fotokomórki kierowane na wejście dwu-



Rys. 1. Schemat rozciągania próbek na młocie rotacyjnym. 1-próbka, 2-górny uchwyt, 3-dynamometr, 4-pazur, 5-dolny uchwyt, 6-koło zamachowe.

kanałowego oscyloskopu typu OKD-514A z wewnętrznie wyzwalaną podstawą czasu pozwalają zmierzyć czas trwania jednego obrotu. Otrzymywany przebieg jest fotografowany. Znając drogę pazura odpowiadającą jednemu obrotowi można obliczyć prędkość v . I tak np. przy wskazaniach fabrycznego miernika 10 ms^{-1} wyliczona prędkość wynosiła $8,1 \text{ ms}^{-1}$.

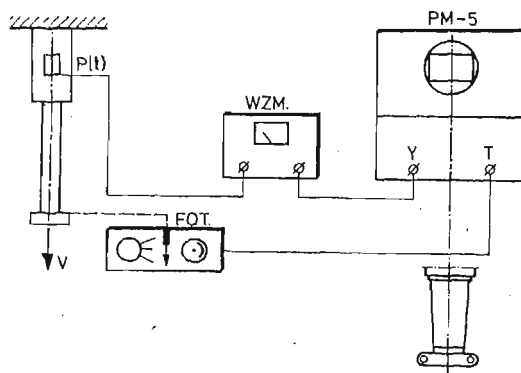
Najistotniejszym problemem w badaniach dynamicznych są pomiary i rejestracja szybkozmiennych sił występujących podczas odkształcania próbek. Wynika to przede wszystkim z bardzo krótkich czasów narastania impulsu, rzędu kilkudziesięciu mikrosekund, jak również ze stosunkowo krótkiego czasu trwania całego procesu. Stąd też zastosowana technika mierzenia sił odgrywa bardzo ważną rolę, decyduje bowiem o poprawności otrzymywanych wyników.

Jak wspomniano poprzednio, młot typu RSO jest wyposażony fabrycznie w czujniki piezokwarcowe do pomiaru siły. Uzyskiwane przebiegi zmiany siły w czasie są jednak znacznie zniekształcone, co jest spowodowane zakłóceniami elektrycznymi samych czujników. Dlatego zmieniono technikę pomiarową, wykorzystując w nowym rozwiązaniu tensometrię elektrooporową. System tego rodzaju jest między innymi szeroko stosowany w pomiarach dynamicznych w Zakładzie Mechaniki Ośrodków Ciągłych IPPT.

Na tulejce o odpowiednio dobranej grubości ścianek, wykonanej z wysokogatunko-

wej stali narzędziowej (NC 10) naklejono po dwa tensometry w układzie samokompensacyjnym. Użyto czujników foliowych ITWL typu FK-3 o bazie pomiarowej 3 mm. Tensometry były zasilane napięciem 6V z jednokanałowego mostka tensometrycznego prądu stałego zbudowanego w IPPT.

Mostek posiadał liniowe pasmo przenoszenia od 0 do 100 kHz. Sygnał napięciowy z mostka kierowany był na wejście dwustrumieniowego oscyloskopu typu PM-5 o paśmie przenoszenia również 0–100 kHz. Rejestracja sygnału odbywała się za pomocą małoobrazkowego aparatu fotograficznego, a wyzwalenie jednorazowej podstawy czasu zsynchronizowane było z uderzeniem pazura młota rotacyjnego w kowadło dolnego uchwyty próbki. Podstawa czasu wyzwalała była przy użyciu fotokomórki, tuż przed samym uderzeniem pazura w próbkę. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Schemat blokowy układu pomiarowego.

Pomiar dynamicznej siły rozciągania przyjęto w oparciu o zasadę pomiarów quasi-statycznych. W myśl tej zasady pomija się efekty falowe zarówno w próbce jak i w dynamometrze. Przyjmuje się, że rozkład naprężeń na długości próbki jest równomierny, co jest wynikiem wielokrotnych odbić fal naprężeń w próbce o krótkiej bazie pomiarowej [12]. Ponadto dynamometr w takich pomiarach powinien znajdować się jak najbliżej próbki, dzięki czemu czas przejścia fal naprężeń od próbki do dynamometru jest stosunkowo krótki. Dla zastosowanego układu czas ten wyliczony dla wzdłużnej fali sprężystej wynosił 0,0273 ms. Porównując go z najkrótszymi czasami rozciągania, które wynosiły średnio ~ 2 ms widać, że jest on około siedemdziesiąt razy krótszy od czasu odkształcania próbki. Wynika stąd, że zaprojektowany układ do pomiaru sił można traktować jako quasi-statyczny. Szersze rozważania na ten temat zostały przedstawione w pracy J. KLEPACZKI [13].

Drugim czynnikiem decydującym o prawidłowości pomiarów jest charakterystyka samego dynamometru. Powinien on mieć odpowiednio dużą częstotliwość i małą amplitudę drgań własnych. Wymagane parametry uzyskuje się przez właściwy dobór masy dynamometru, z równoczesnym uwzględnieniem masy uchwyty próbki, jak również odpowiednią jego sztywność. Okres drgań własnych T_0 dynamometru powinien być co najmniej kilkakrotnie krótszy od czasu odkształcania próbki. Częstość drgań własnych stosowanego w pracy dynamometru, pomierzona na oscylogramach po zerwaniu próbki wynosiła 5269 Hz, co odpowiada okresowi $T_0 = 0,189$ ms. Tak więc okres drgań własnych jest

około dziesięć razy krótszy od czasu rozciągania próbki, czyli i pod tym względem pomiary można traktować jako quasistatyczne.

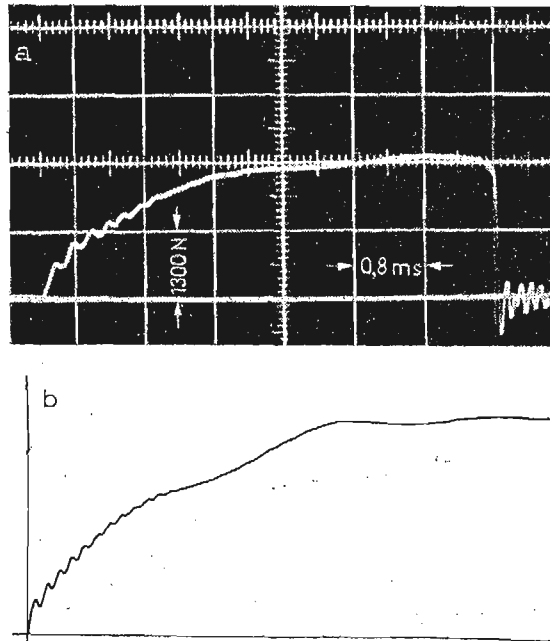
Opisany układ działał sprawnie. Należy tutaj jednak pamiętać, że przy pomiarach dynamicznych na odpowiedź dynamometru może w znacznym stopniu wpływać częstość drgań elementów, do których jest on zamocowany. Zjawisko to, mające wpływ na wynik pomiarów, należy uwzględnić podczas interpretacji wyników, zostało ono dokładnie prze dyskutowane w dalszej części pracy.

3. Wyniki doświadczeń — oscylogramy $P(t)$

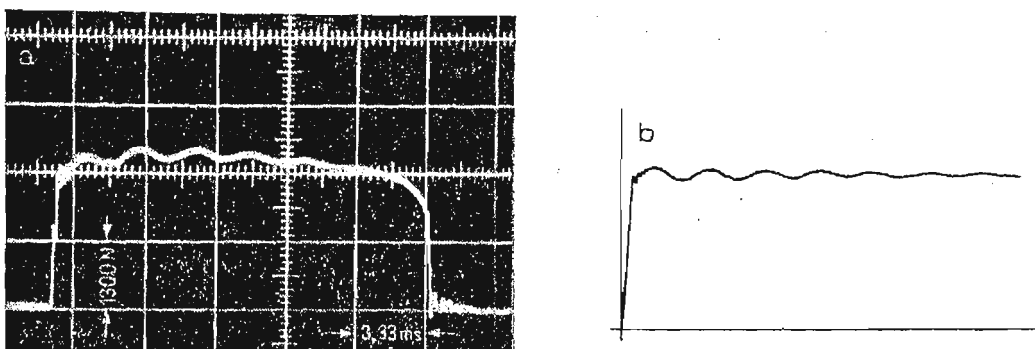
Do badań wybrano dwa materiały, w tym jeden w dwóch stanach — blachę miedzianą (99,90% Cu) o grubości 1,5 mm w stanie wyżarzonym oraz blachę stalową głębokotłoczną (0,11% C) o grubości 1 mm w stanie po walcowaniu i w stanie wyżarzonym. Doświadczenia przeprowadzono na próbkach o długości bazy pomiarowej 35 mm i szerokości 7 mm.

Po wzorcowaniu statycznym dynamometru za pomocą maszyny wytrzymałościowej przeprowadzono próby dynamiczne z oscyloskopową rejestracją siły rozciągającej P w funkcji czasu t . Próby te wykonano przy różnych prędkościach wymuszenia mechanicznego v , co odpowiadało różnym prędkościom odkształcenia. Typowe oscylogramy z takich prób dla miedzi przedstawiono na rys. 3a, dla próbek z blachy stalowej w stanie po walcowaniu na rys. 4a i 5a, natomiast dla blachy stalowej w stanie wyżarzonym na rys. 6.

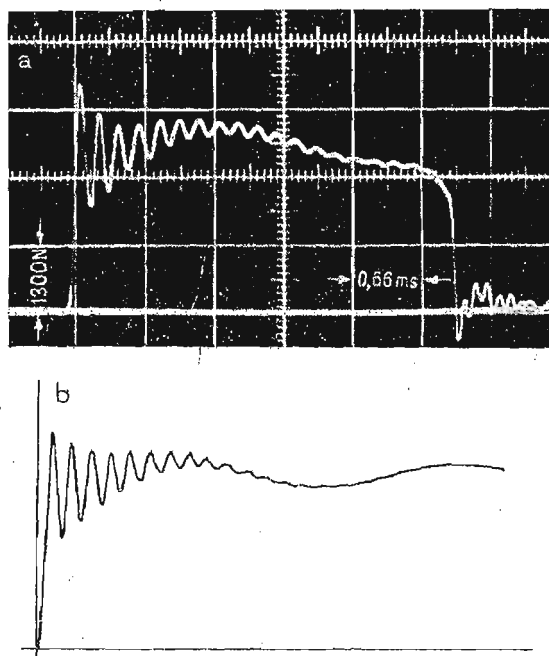
Na podstawie uzyskanych krzywych można zaobserwować, że w obszarze plastycznego płynięcia materiału obserwuje się występowanie przebiegów periodycznych o dwóch róż-



Rys. 3. Oscylogram pomiaru siły rozciągania dla próbki miedzianej odkształcanej z prędkością $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ (a) oraz rozwiązanie z maszyny analogowej dla impulsu wymuszającego typu C (b).



Rys. 4. Oscylogram pomiaru siły rozciągania dla próbki stalowej walcowanej odkształcanej z prędkością $v = 1 \text{ ms}^{-1}$ (a) oraz rozwiązanie z maszyny analogowej dla impulsu wymuszającego typu A (b).



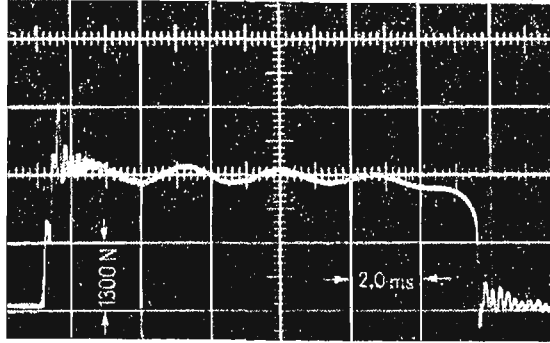
Rys. 5. Oscylogram pomiaru siły rozciągania dla próbki stalowej walcowanej odkształcanej z prędkością $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ (a) oraz rozwiązanie z maszyny analogowej dla impulsu wymuszającego typu A (b).

nych częstotliwościach. Zjawiska takie są charakterystyczne dla dynamicznego zachowania się układu mechanicznego.

W badaniach dynamicznych istnieje potrzeba określenia rzeczywistej odpowiedzi dynamometru. W przypadku gdy dynamometr zostaje poddany obciążeniu udarowemu, jego odpowiedź może znacznie odbiegać w danej chwili od proporcjonalności do rzeczywistej wartości przyłożonej siły. Wynika to z faktu, iż w takich warunkach w dynametrze zostają wzbudzone drgania o określonej częstotliwości własnej. Drgania dynamometru przejawiają się na uzyskanych oscylogramach w postaci periodycznego przebiegu o wysokiej częstotliwości (5269 Hz). Amplituda tego przebiegu zależy od czasu narastania impulsu siły,

niezależnie od sztywności układu. Stąd szczególnie wyraźne oscylacje widoczne są przy większych prędkościach uderzenia (rys. 5a), podczas gdy przy mniejszych prędkościach koncentrują się one w obszarze początkowym krzywej $P(t)$ i zanikają (rys. 3a, 4a i 6).

Niezależnie od obserwowanego obrazu drgań dynamometru, na oscylogramach otrzymanych przy małych prędkościach uderzenia v zaznacza się wyraźnie przebieg periodyczny



Rys. 6. Oscylogram pomiaru siły rozciągania dla próbki stalowej (stan wyżarzony) odkształcanej z prędkością $v = 1 \text{ ms}^{-1}$.

o dużo mniejszej częstotliwości. Przy większych prędkościach oscylacje te są mniej widoczne. Pomiar oscylogramów wykazały, że częstota tego przebiegu jest niezależna od rodzaju odkształcanego materiału i wynosi średnio 369 Hz. Na tej podstawie należy sądzić, że spowodowany jest on drganiami elementów, do których zamocowany jest dynamometr.

Zjawisko drgań konstrukcji nośnej dynamometru, oddziałujące na jego odpowiedź, nie jest do tej pory dobrze poznane. Zniekształcenia pomiaru które wywołuje mogą w bardzo istotny sposób wpływać na interpretacje uzyskiwanych wyników z prób dynamicznych. Na przykład oscylogramy dla stali w stanie po walcowaniu rozciąganej przy prędkości uderzenia $v = 4 \text{ ms}^{-1}$ (rys. 5a) mają ogólny kształt w postaci fragmentu zbliżonego do sinusoidy, co jest niewątpliwie nietypową charakterystyką dla tego materiału. Należy przypuszczać, że obraz ten jest wynikiem znacznie większej prędkości odkształcenia i stąd krótszego czasu rejestracji dla $v = 4 \text{ ms}^{-1}$, w porównaniu do mniejszych prędkości, dla których obserwuje się kilka okresów tego zakłócenia (rys. 4a).

Potwierdzenie takiej interpretacji można uzyskać w oparciu o analizę dynamicznego układu mechanicznego, który stanowi konstrukcja nośna — dynamometr-próbka. Ponieważ oscylogramy są podstawą do otrzymania dynamicznych krzywych umocnienia, celem jest przeprowadzenie takiej analizy, by w ten sposób wyeliminować zakłócenia pomiaru i uzyskać rzeczywistą wartość siły rozciągania.

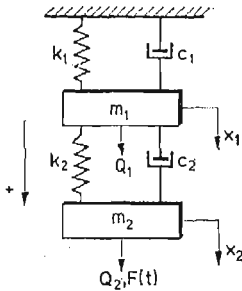
4. Metodyka interpretacji oscylogramów $P(t)$

Przeprowadzając teoretyczną analizę rzeczywistego układu mechanicznego, stosuje się zawsze uproszczenia pomijające szereg drugorzędnych jego własności.

Rozpatrywany układ mechaniczny konstrukcja nośna — dynamometr — próbka można idealizować dyskretnym modelem fizycznym o trzech stopniach swobody. Biorąc jednak

pod uwagę, że o strukturze układu (liczbie stopni swobody) wnioskuje się na podstawie charakteru wzbudzanego procesu drgań, to z analizy rzeczywistych krzywych $P(t)$ wynika, że powyższy układ można uprościć, sprowadzając go do układu drgającego o dwóch stopniach swobody. Za takim uproszczeniem przemawia fakt, iż oscylogramy stanowią pewną superpozycję przebiegów periodycznych o dwóch różnych częstościach.

Utworzony model układu mechanicznego pokazano na rys. 7. Masa m_1 reprezentuje masę zredukowaną konstrukcji nośnej, a m_2 dynamometru. Stałe k_i i c_i ($i = 1, 2$) obrazują



Rys. 7. Schemat analizowanego układu mechanicznego.

odpowiednio współczynniki sztywności i tłumienia. Próbką została pominięta, jednak należy zauważyć, że parametry k_2 i c_2 uwzględniają ją pośrednio. Rodzaj materiału próbki wpływa bowiem na wartość amplitudy obu przebiegów. Znacznie wyższą amplitudę, przy danej prędkości uderzenia, daje się zauważyć dla stali niż dla miedzi. Czynnikiem powodującym to zjawisko jest różna reakcja sprężysta tych materiałów. Wyższa dla stali aniżeli dla miedzi.

Punktem wyjścia do dalszej dyskusji problemu jest opisanie modelu układem równań różniczkowych. Jako współrzędne uogólnione przyjęto przemieszczenia mas x_i ($i = 1, 2$) o dodatnich zwrotach pokazanych na rys. 7. Wprowadzając współrzędne główne ξ_k , które związane są ze współrzędnymi uogólnionymi następującą zależnością:

$$(1) \quad x_i = \sum_k \lambda_k \mu_{ik} \xi_k(t),$$

równania różniczkowe ruchu układu o dwu stopniach swobody można przedstawić w postaci:

$$(2) \quad M_{kk} \ddot{\xi}_k + \sum_l C_{kl} \dot{\xi}_k + K_{kk} \xi_k = F_k, \quad k, l = 1, 2,$$

gdzie M_{kk} oznaczają uogólnione masy, C_{kl} uogólnione współczynniki tłumienia, K_{kk} uogólnione sztywności, a F_k uogólnione siły. Ponadto $\dot{\xi} = d\xi/dt$, gdzie t oznacza czas, λ_k jest dowolną stałą, a μ_{ik} przedstawiają tzw. współczynniki postaci drgań głównych, charakteryzujące formę k -tego drgania głównego.

Należy dodać, że równania (2) opisujące tzw. drgania główne, mogą odnosić się do obiektu o dowolnej liczbie stopni swobody.

Łatwo zauważyć, że jeżeli $C_{kl} = 0$ dla $k \neq l$, a więc macierz współczynników tłumienia jest diagonalna, to równania (2) przyjmują postać:

$$(3) \quad M_{kk} \ddot{\xi}_k + C_{kl} \dot{\xi}_k + K_{kk} \xi_k = F_k, \quad k, l = 1, 2,$$

i są układami równań rozprzężonych. Oznacza to, że każde z nich opisuje drganie wymuszone, tłumione, układu o jednym stopniu swobody. Wynika stąd, że postać drgań wymuszonych przez każdą z sił F_k jest taka sama, jak postać k -tego drgania głównego.

Jako podstawę do dalszych rozważań przyjęto równania (3). Siły uogólnione F_k można zapisać w następującej postaci:

$$(4) \quad F_k = \lambda_k \sum_i Q_i \mu_{ik},$$

gdzie Q_i jest rzeczywistą siłą przyłożoną do badanej konstrukcji. W rozważanym przypadku (zgodnie z rys. 7) $Q_1 = 0$, natomiast $Q_2 = F$. Wynika to z faktu, że siła F przyłożona do próbki oddziałuje bezpośrednio na dynamometr. Przyjmując powyższe warunki, oraz $\lambda_k = 1$, związek (4) dla rozpatrywanego układu można zapisać jako:

$$(5) \quad F_k = F \mu_{2k}, \quad k = 1, 2,$$

Wprowadzając dalej następujące oznaczenia: $K_{kk}/M_{kk} = \omega_{ok}^2$ oraz $C_{kk}/M_{kk} = 2h_k$, równania różniczkowe ruchu układu konstrukcja nośna-dynamometr-próbka można przedstawić następująco:

$$(6) \quad \ddot{\xi}_k + 2h_k \dot{\xi}_k + \omega_{ok}^2 \xi_k = \frac{\mu_{2k}}{M_{kk}} F(t), \quad k = 1, 2$$

gdzie ω_{ok} są częstościami kątowymi drgań własnych, a h_k współczynnikami tłumienia.

Efektywne rozwiązanie równań (6), z odpowiednimi warunkami początkowymi, jest niemożliwe, jeżeli nieznanne są wartości występujących w nich współczynników, na podstawie których można uzyskać pełny matematyczny opis zjawisk fizycznych zachodzących w badanym obiekcie. Współczynniki te można jednak wyznaczyć doświadczalnie, wykorzystując jedną z metod identyfikacji dynamicznego układu mechanicznego.

Znane i powszechnie stosowane metody identyfikacji dynamicznej polegają na badaniu odpowiedzi układu w wybranych jego punktach, podczas działania na układ kontrolowanych wymuszeń (obciążeń). Metody te mają charakter eksperymentu czynnego. W przypadku obecnej pracy eksperyment miał charakter bierny. Dysponowano jedynie odpowiedziami układu rzeczywistego na wymuszenie, w postaci obciążenia udarowego próbek. Nie istniała możliwość stosowania kontrolowanych obciążeń.

W związku z powyższym problem polegał na sprawdzeniu, czy układ równań (6) z wyznaczonymi współczynnikami dostatecznie dokładnie opisuje zachowanie się układu rzeczywistego.

Współczynniki h_k i ω_{ok} ($k = 1, 2$), stanowiące podstawę do rozwiązania związków (6), wyznaczono bezpośrednio z oscylogramów $P(t)$. Było to możliwe ze względu na znaczne różnice w częstościach obu przebiegów periodycznych, reprezentujących odpowiednie formy drgań. Z pomiarów oscylogramów wyznaczono okresy drgań tłumionych T_h oraz logarytmiczne dekrementy tłumienia $A = \ln \frac{a(t)}{a(t+T_h)}$ (logarytm naturalny stosunku dwu kolejnych amplitud). W obliczeniach dekrementu tłumienia pomijano wartość pierwszej amplitudy, a z pozostałych wyznaczano wartości średnie. Na podstawie znalezionych wielkości oraz korzystając z poniższych zależności:

$$\omega = 2\pi/T_h, \quad A = h \cdot T_h \quad \text{i} \quad \omega_0^2 = \omega^2 + h^2,$$

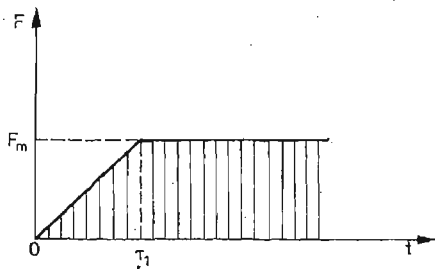
wyznaczono wartości odpowiednich współczynników. Wynoszą one:

$$\begin{aligned}\omega_{01} &= 2319 \text{ s}^{-1}, & h_1 &= 85 \text{ s}^{-1}, \\ \omega_{02} &= 33106 \text{ s}^{-1}, & h_2 &= 1579 \text{ s}^{-1}.\end{aligned}$$

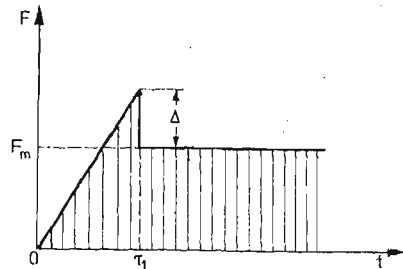
Do pełnej analizy drgań wymagana jest znajomość impulsu wymuszającego $F(t)$. Dokładny zapis matematyczny wymuszenia nie był znany, dlatego też określono jakościowo jego przebieg na podstawie charakteru fizycznego próby oraz odpowiedzi układu rzeczywistego. Uzyskane oscylogramy $P(t)$, przedstawiające przebieg czasowy siły rozciągania, mogą być traktowane jako reakcja układu na wymuszenie o charakterze impulsowym. Z otrzymanych przebiegów dla stali widać, że można je aproksymować impulsami o kształtach regularnych, ograniczonych odcinkami prostych. W przypadku natomiast oscylogramów dla miedzi aproksymacja wymuszenia może być dokonana funkcją o charakterze potęgowym. W związku z powyższym przyjęto trzy rodzaje impulsów wymuszających $F(t)$:

A) Siła wzrasta liniowo w czasie, następnie zachowuje stałą wartość, jak pokazano to na rys. 8. Impuls ten charakterystyczny jest dla stali po walcowaniu (rys. 4).

B) Siła wzrasta liniowo do określonej wartości, a następnie gwałtownie spada do pewnej wartości i pozostaje stała. Przypadek ten, pokazany na rys. 9, charakterystyczny jest dla stali wyżarzzonej (rys. 6), posiadającej wyraźną granicę plastyczności.



Rys. 8. Postać impulsu wymuszającego typu A.



Rys. 9. Postać impulsu wymuszającego typu B.

C) Siła zmienia się wg. paraboli, która w pewnym przybliżeniu może opisać zachowanie się miedzi.

W przypadkach A i B czas narastania siły τ_1 dobierano na podstawie pomiarów oscylogramów. Wynosił on średnio 0,55; 0,40; 0,12 i 0,10 ms odpowiednio dla prędkości uderzenia 1; 1,5; 4 i 8 ms^{-1} .

Należy tu dodać, że rzeczywistą odpowiedź układu stanowi sygnał z czujników tensometrycznych dynamometru, który w przyjętym modelu był reprezentowany przez element sprężysty k_2 . Przyjmując, że odkształcenie rozciągające ma znak plus a ściskające minus, założono, że tensometr mierzący odkształcenie jest równocześnie miernikiem różnicy przemieszczeń $x_2 - x_1$. Przekształcając zatem równania (1) (dla $\lambda_k = 1$) można pokazać, że odpowiedź układu rzeczywistego ($x_2 - x_1$) stanowi sumę wartości współrzędnych głównych ξ_1 i ξ_2 z odpowiednimi współczynnikami. Otrzymuje się bowiem:

$$(7) \quad x_2 - x_1 = (\mu_{21} - \mu_{11})\xi_1 + (\mu_{22} - \mu_{12})\xi_2.$$

Badania identyfikacji układu drgającego konstrukcja nośna-dynamometr-próbka po-

legały na uzyskaniu w postaci graficznej sumy całek ogólnych równań (6) przy zerowych warunkach początkowych, a następnie porównaniu jej z odpowiedziami układu rzeczywistego (oscylogramami). W badaniach wykorzystano technikę analogową.

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń otrzymano graficzne rozwiązania równań ruchu układu mechanicznego, z których charakterystyczne pokazano na rys. 3b, 4b i 5b. Porównując uzyskane rozwiązania z maszyny analogowej z odpowiadającymi im rzeczywistymi przebiegami $P(t)$ (rys. 3a, 4a i 5a) stwierdzono, że występowała pomiędzy nimi zadawalająca zgodność. Wskazuje to, że przyjęty model matematyczny układu rzeczywistego w poprawny sposób opisywał badane zjawisko.

Należy zaznaczyć, że w praktyce nie jest możliwe uzyskanie idealnej zgodności (szczególnie co do wartości amplitud) pomiędzy przebiegami teoretycznymi a rzeczywistymi. Wynika to z faktu, iż model jest zazwyczaj układem liniowym (tłumienie wiskotyczne), podczas gdy warunek ten nie odpowiada ściśle układom rzeczywistym.

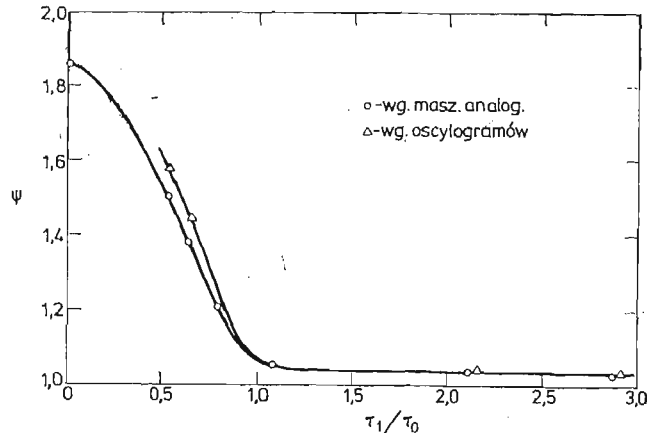
Z przeprowadzonej identyfikacji układu wynika, że obserwowany na oscylogramach proces oscylacji siły jest rezultatem drgań mechanicznych i zachodzi wokół krzywej, która odpowiada rzeczywistej sile rozciągania próbki. Do dalszej zatem interpretacji danych doświadczalnych niezbędne jest wyznaczenie tej krzywej. Ponieważ przebieg periodyczny o wysokiej częstotliwości, który łatwo jest uśrednić, nałożony jest na przebieg o niskiej częstotliwości, wobec tego rzeczywista krzywa $P(t)$ jest linią wokół której oscyluje ten ostatni. Prowadząc obwiednię tego przebiegu na odpowiednio powiększonych oscylogramach i uśredniając ją graficznie, wyznaczono poszukiwaną krzywą $P(t)$. Wiadomo jednak, że uśrednianie takie jest możliwe, gdy występuje kilka okresów przebiegu. Stąd na oscylogramach uzyskanych dla stali rozciąganej przy prędkościach 4 i 8 ms^{-1} , na których występował z reguły jeden niepełny okres przebiegu o niskiej częstotliwości, trudno było wyznaczyć rzeczywistą, były pozwalał zmianę w czasie siły rozciągania. W przypadku miedzi, amplitudy przebiegu bardzo małe, a ponadto przewidywany charakter krzywych rozciągania dość dokładnie je wyznaczyć.

Wnioskiem wypływającym z przedstawionych powyżej uwag jest stwierdzenie, że drgania konstrukcji nośnej dynamometru mogą w znacznym stopniu wpływać na poprawną interpretację wyników badań dynamicznych. Aby nie zniekształcały one rzeczywistej wartości siły, czas trwania próby dynamicznej powinien być znacznie dłuższy od okresu drgań elementów do których przytwierdzony jest dynamometr. W przypadku obecnego układu mechanicznego warunek ten, był spełniony.

Dokonując analizy uzyskanych wyników należy zinterpretować pierwsze maksimum siły, w szczególności widoczne na oscylogramach dla próbek stalowych. Niekiedy [14] wartość tego maksimum na krzywych dynamicznych interpretowano jako siłę odpowiadającą górnej granicy plastyczności. Jak wynika natomiast z rys. 4, 5 oraz 6 interpretacja taka jest błędna, bowiem wartość pierwszego maksimum zależy nie tylko od zachowania się odkształcanego materiału lecz również od reakcji dynamicznej układu mechanicznego. Reakcję dynamiczną charakteryzuje tzw. współczynnik dynamiczny, który jest stosunkiem maksymalnego przemieszczenia układu (pierwsze maksimum) do przemieszczenia statycznego (wartości ustalonej).

Wyizolowanie poszczególnych form drgań przy użyciu maszyny analogowej wykazało, że współczynnik dynamiczny układu związany jest jedynie z formą drgań o wysokiej częstot-

ści. Jego wartość zależy od postaci i czasu narastania impulsu wymuszającego. W celu ilościowego określenia wpływu tych czynników, na zamodelowany układ o jednym stopniu swobody i parametrach odpowiadających wysokiej częstotliwości drgań, działano impulsem wymuszającym typu A, o różnym czasie narastania siły w zakresie od 0,10 do 0,55 ms oraz impulsem typu B, przy różnym stosunku wartości „piku” Δ (rys. 9) do ustalonej wartości siły. Na podstawie uzyskanych rozwiązań sporządzono zależność współczynnika dynamicznego ψ w funkcji bezwymiarowego czasu narastania siły, którą pokazano na rys. 10. Z przedstawionego wykresu wynika, że współczynnik dynamiczny bardzo wy-



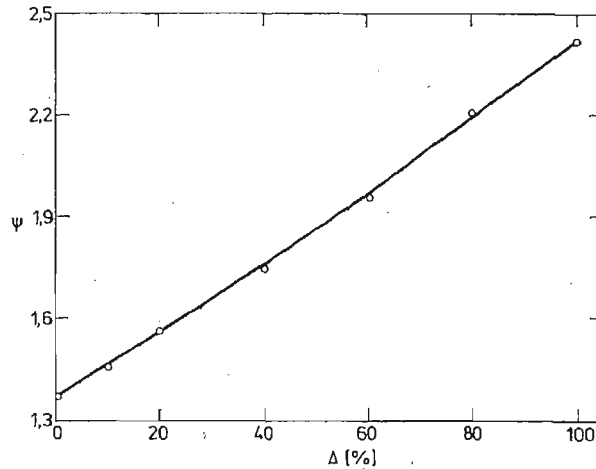
Rys. 10. Zmiana współczynnika dynamicznego ψ w funkcji bezwymiarowego czasu narastania siły.

rażnie zmniejsza się wraz ze wzrostem stosunku τ_1/T_0 , gdzie T_0 jest okresem drgań własnych. Dla $\tau_1/T_0 > 1$ współczynnik dynamiczny ψ jest mniejszy od 1,05, co wskazuje, że z dokładnością do 5% dla $\tau_1 > T_0$ można przyjąć $\psi \approx 1$.

W przypadku działania impulsu typu B obserwuje się dość intensywny wzrost współczynnika ψ wraz ze wzrostem procentowej wartości „piku” Δ (rys. 11). Dla $\tau_1 = 0,12$ ms ψ zmienia się od 1,37 przy 0% Δ do 2,41 przy 100% Δ .

Obciążenie układu impulsem typu B wiąże się w rzeczywistości z wyższą reakcją sprężystą odkształcanego materiału aniżeli dla impulsu typu A, oczywiście pod warunkiem, że w obu przypadkach ustalona wartość siły jest taka sama. Dokładna analiza porównawcza oscylogramów dla stali walcowanej z uzyskanymi dla nich rozwiązaniami przy wymuszeniu typu A wykazała, że o ile przy mniejszych prędkościach odkształcenia tego materiału ($v = 1,0$ i $1,5$ ms⁻¹) pierwsze maksimum siły na oscylogramach pokrywa się z pierwszym maksimum przemieszczenia układu, to w przypadku większych prędkości ($v = 4$ i 8 ms⁻¹) krzywe rzeczywiste mają nieco wyższe pierwsze amplitudy przebiegu o wysokiej częstotliwości aniżeli krzywe modelowe. Wyliczone współczynniki dynamiczne z oscylogramów dla stali walcowanej naniesiono na rys. 10. Porównując rzeczywiste wartości ψ z wartościami uzyskanymi z modelu stwierdza się, że te pierwsze dla $\tau_1/T_0 < 1$ są nieco wyższe. Wskazuje to, że obliczona reakcja sprężysta układu, odpowiadająca impulsowi typu A jest zbyt mała, by mogła wywołać pierwszą amplitudę o wartości odpowiadającej przebiegowi rzeczywistemu. Zastosowanie natomiast w badanym układzie impulsu wymuszającego typu B przy 10% „piku” dało wartości pierwszych amplitud zgodne z odpowia-

dającymi im wartościami uzyskanymi na oscylogramach przy prędkości $v = 4 \text{ ms}^{-1}$. Dla krzywych $P(t)$ uzyskanych przy prędkości $v = 8 \text{ ms}^{-1}$ pokrywanie się pierwszych amplitud zachodziło dla impulsu mającego około 20% wartości „piku”. Należy zatem wnioskować, że przy prędkościach uderzenia większych od $1,5 \text{ ms}^{-1}$ dla badanej stali walcowanej zaczyna się uwidaczniać wyraźna granica plastyczności.



Rys. 11. Zmiana współczynnika dynamicznego ψ w funkcji procentowej wartości „piku” Δ dla impulsu wymuszającego typu B; czas narastania impulsu $\tau_1 = 0,12 \text{ ms}$.

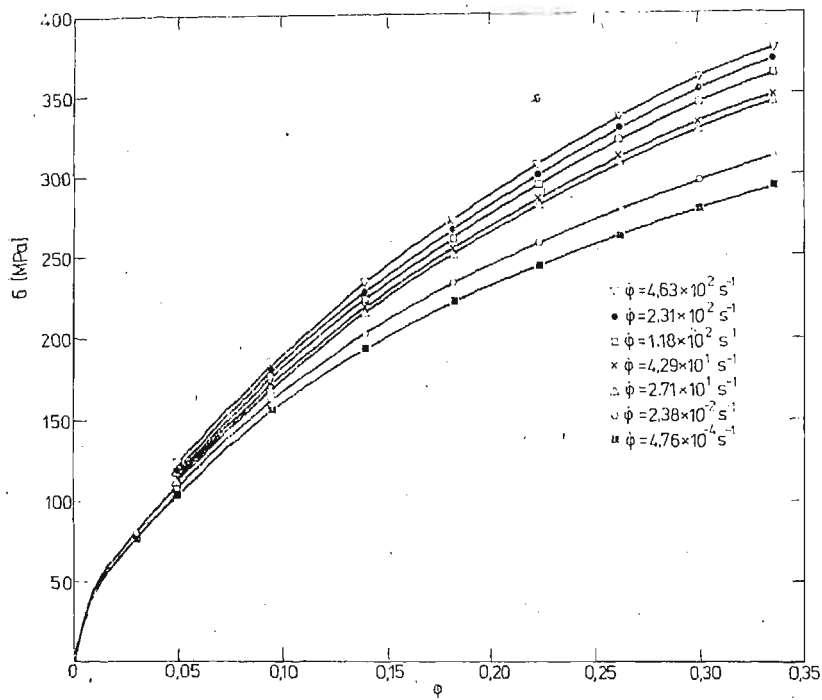
Znajomość wartości współczynnika dynamicznego ψ posiada bardzo istotne znaczenie dla materiałów wykazujących wyraźną granicę plastyczności. Rzeczywista górna granica plastyczności σ_g będzie bowiem wynosić $\sigma_g = \sigma_{\max}/\psi$, gdzie σ_{\max} jest obliczeniową wartością naprężenia odpowiadającą pierwszemu maksymalnemu wychyleniu na krzywych $P(t)$.

Występowanie dla stali wyżarzonej wyraźnej górnej i dolnej granicy plastyczności wymagało zatem przeprowadzenia odpowiedniej korekty uzyskanych oscylogramów. Postępowano w ten sposób, że dla wybranych oscylogramów poszukiwano na maszynie analogowej rozwiązań, najdokładniej opisujących zarejestrowany przebieg rzeczywisty, za wyjątkiem pierwszej amplitudy. Amplitudy drgań regulowano różnymi wartościami „piku” przy impulsach wymuszających typu B. Następnie dla znalezionych rozwiązań wyliczono współczynniki dynamiczne, których wartości były równe współczynnikom korekcyjnym dla pierwszego maksimum siły na oscylogramach. Wyznaczone średnie wartości współczynników korekcyjnych dla stali wyżarzonej wynosiły 1, 10; 1,12; 1,36 odpowiednio dla prędkości uderzenia 1; 1,5 i 4 ms^{-1} .

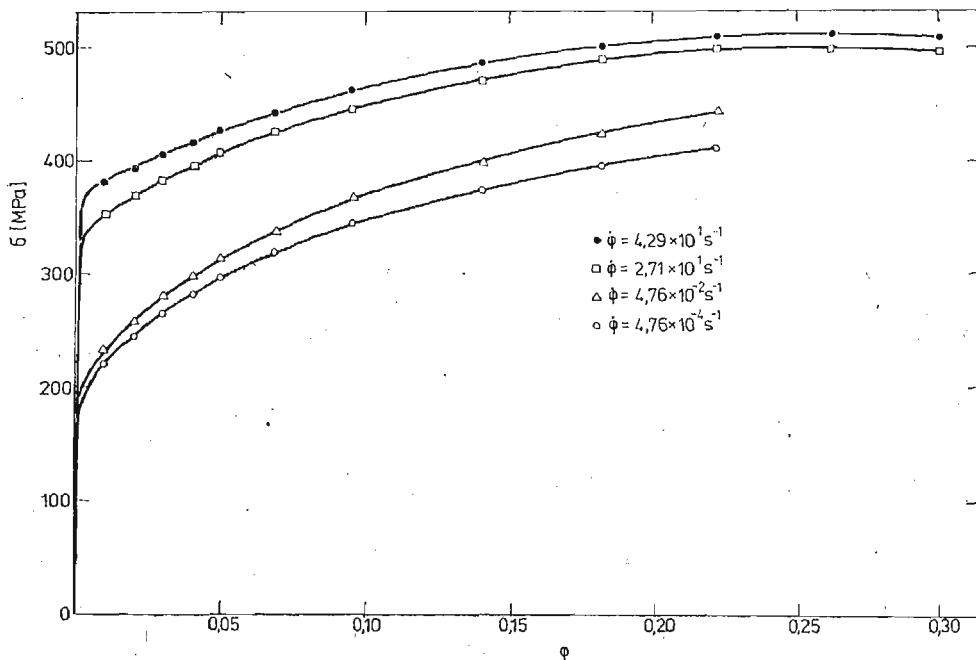
Z przeprowadzonych w tej części pracy rozważań wynika, że z punktu widzenia eksperymentu w warunkach dynamicznych, istotne znaczenie posiada fakt pełnego rozumienia wszystkich charakterystycznych zakłóceń, zniekształcających pomiar w stosunku do rzeczywistych obciążeń działających na odkształcaną próbkę.

5. Krzywe umocnienia

Przyjęcie założenia o stałej prędkości odkształcania, pozwoliło traktować uzyskane krzywe $P(t)$ na równi z zależnością $P(\Delta l)$, jednak z odpowiednio zmienionymi współrzędnymi



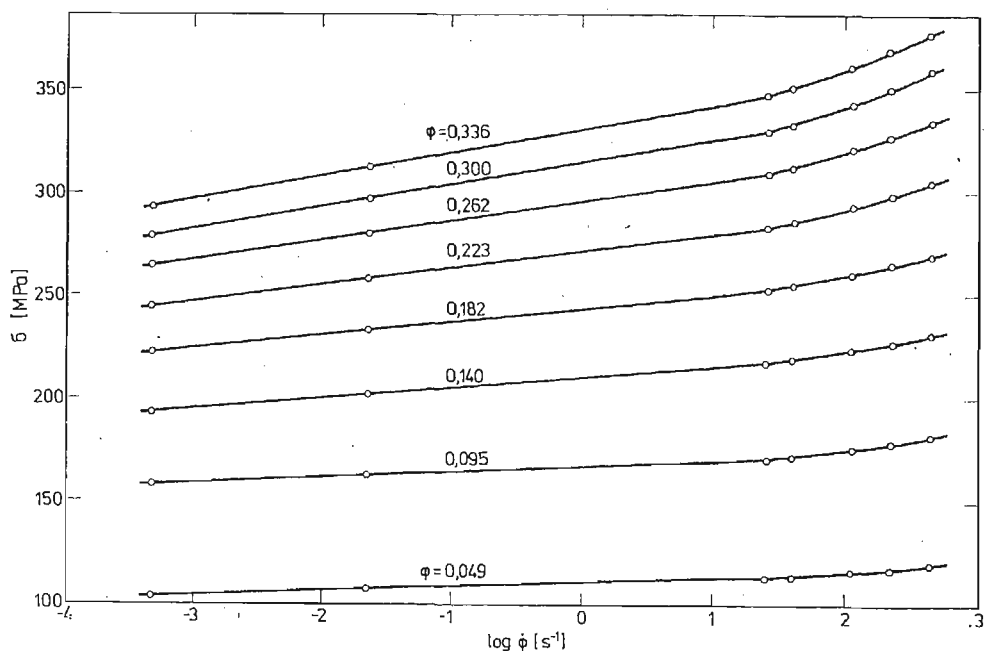
Rys. 12. Uśrednione krzywe umocnienia dla badanej miedzi uzyskane przy poszczególnych prędkościach odkształcenia.



Rys. 13. Uśrednione krzywe umocnienia dla badanej stali walcowanej uzyskane przy poszczególnych prędkościach odkształcenia.

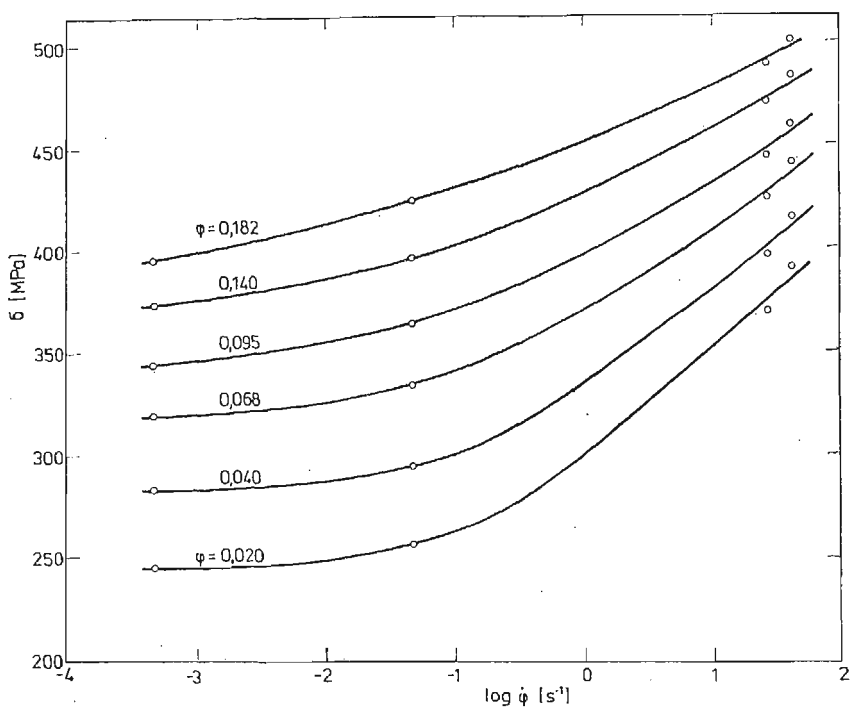
nymi osi odciętych. Na tej podstawie oscylogramy przeliczono, po dokonaniu odpowiednich pomiarów, na zależności naprężenia rzeczywistego σ w funkcji odkształcenia logarytmicznego φ . Uzyskane w ten sposób krzywe umocnienia dla różnych prędkości odkształcenia, pomierzone przy użyciu młota rotacyjnego, przedstawiono odpowiednio dla miedzi i stali po walcowaniu na rys. 12 i 13. Na rysunkach tych wykreślono również krzywe umocnienia dla małych prędkości odkształcenia $4,76 \cdot 10^{-4}$ i $4,76 \cdot 10^{-2} \text{s}^{-1}$. Krzywe te otrzymano za pomocą maszyny wytrzymałościowej Instron, przy czym używano próbek o identycznych wymiarach jak w badaniach dynamicznych. Wszystkie krzywe zostały sporządzone przez uśrednienie pomiarów z 3 - 4 próbek.

W oparciu o uzyskane wyniki można stwierdzić, że zmiana prędkości odkształcenia powoduje odpowiednią zmianę krzywej umocnienia badanych materiałów. Świadczy to, że badane materiały są wrażliwe na prędkość odkształcenia. Tę właściwość materiału wygodnie jest przedstawić na wykresie w układzie półlogarytmicznym $\sigma(\log \dot{\varphi})$, jak to pokazano odpowiednio dla miedzi i stali na rys. 14 i 15. Każda z krzywych dotyczy innej war-

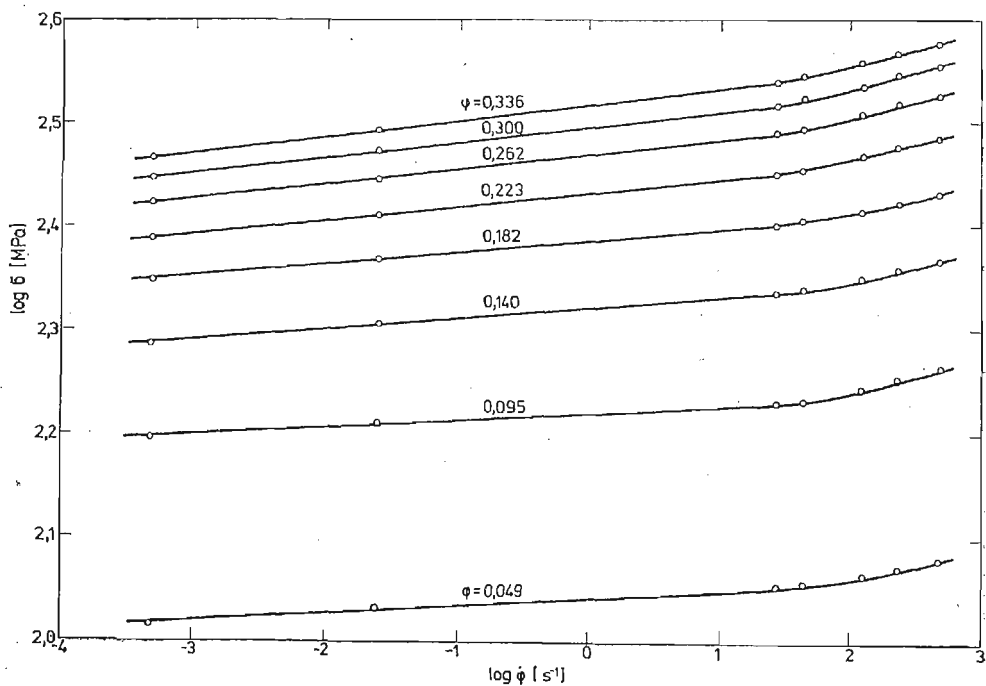


Rys. 14. Wykresy $\sigma(\log \dot{\varphi})$ dla miedzi uzyskane z uśrednionych krzywych umocnienia dla poszczególnych wartości odkształceń φ

tości odkształcenia. Jak widać z przebiegu krzywych dla miedzi, wpływ prędkości odkształcenia na naprężenie plastycznego płynięcia przy $\varphi = \text{const}$ przejawia się w postaci monotonicznie rosnącej funkcji prędkości odkształcenia. Czułość na prędkość odkształcenia β , którą można zdefiniować jako $\beta = \partial\sigma/\partial\log\dot{\varphi}$, zwiększa się zarówno ze wzrostem odkształcenia φ jak i prędkości odkształcenia $\dot{\varphi}$. Na skutek rozrzutu wyników w zakresie małych odkształceń, tj. dla $\varphi < 0,05$ przy prędkościach odkształcenia od $2,71 \cdot 10^1$ do $4,63 \cdot 10^2 \text{s}^{-1}$, nie było możliwe określenie ścisłej zależności pomiędzy prędkością odkształcenia a naprężeniem w tym zakresie.



Rys. 15. Wykresy $\sigma(\log \dot{\phi})$ dla stali walcowanej uzyskane z uśrednionych krzywych umocnienia dla poszczególnych wartości odkształceń ϕ .



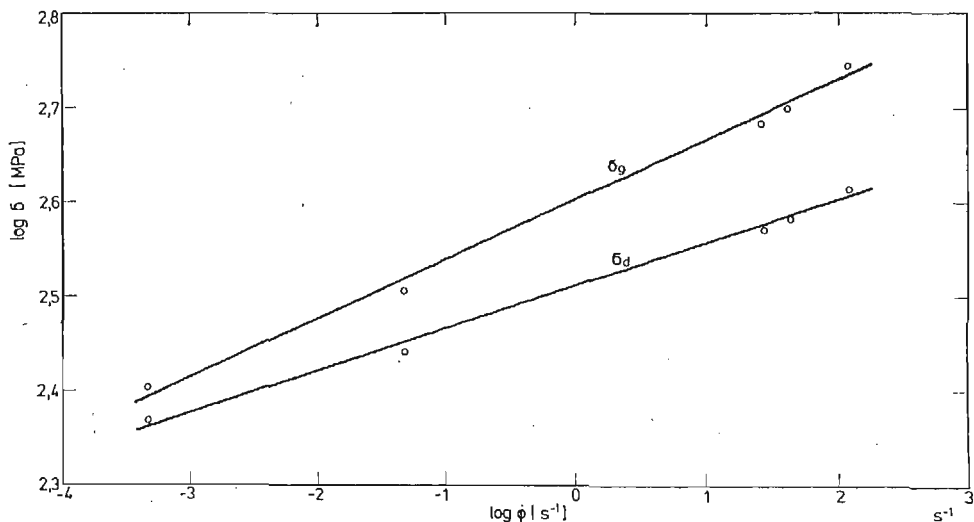
Rys. 16. Wykresy $\log \sigma(\log \dot{\phi})$ dla miedzi.

W przypadku stali walcowanej obserwuje się nieco inną reakcję na prędkość odkształcania. O ile w zakresie małych prędkości odkształcania $\dot{\varphi}$ od $4,76 \cdot 10^{-2}$ do $4,76 \cdot 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ czułość na prędkość odkształcania β jest stosunkowo niska i zmienia się od 6,5 do 14,3 MPa w przedziale odkształceń φ od 0,020 do 0,182, to dla $\dot{\varphi}$ większych od $4,76 \cdot 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ średnie wartości β są znacznie wyższe i zmieniają się od około 43 do 30 MPa w tym samym zakresie odkształceń. Ponadto β maleje w miarę wzrostu odkształcania. Wyraźna różnica w czułości na prędkość odkształcania stali w poszczególnych zakresach spowodowana jest, jak wynika z pracy [15], różnymi mechanizmami odkształcania plastycznego występującymi w poszczególnych zakresach prędkości odkształcania.

Wprowadzone wyżej pojęcie czułości na prędkość odkształcania β jest o tyle trafne, że posiada duże znaczenie przy interpretacji wyników od strony fizycznej. Jednak z inżynierskiego punktu widzenia bardzo często stosuje się definicję czułości na prędkość odkształcania jako $n = \partial \log \sigma / \partial \log \dot{\varphi}$. Korzystając z tej definicji sporządzono zależność $\log \sigma$ ($\log \dot{\varphi}$), którą dla miedzi przedstawiono na rys. 16. Z przedstawionego wykresu wynika, że n , podobnie jak β , zmienia się nieco w zależności od odkształcania oraz prędkości odkształcania. Średnia wartość tej stałej wynosi $n = 0,0187$. Jest ona porównywalna do wartości $n = 0,0146$ jaką uzyskano w pracy [16].

Badana blacha stalowa walcowana w zakresie prędkości odkształcania od $4,76 \cdot 10^{-4}$ do $4,29 \cdot 10^1 \text{ s}^{-1}$ nie wykazywała zjawiska górnej i dolnej granicy plastyczności. Fakt ten jest prawdopodobnie spowodowany zgniotem powierzchniowym materiału, powstałym w wyniku walcowania wygładzającego w procesie hutniczym. Przy wyższych prędkościach odkształcania, o czym wspomniano uprzednio, najprawdopodobniej pojawi się dla tego materiału wyraźna granica plastyczności.

Występowanie przy dużych prędkościach odkształcania wyraźnej granicy plastyczności dla materiałów, które przy mniejszych prędkościach odkształcania jej nie wykazują, jest zjawiskiem dość często spotykanym.



Rys. 17. Zmiana górnej σ_g i dolnej σ_d granicy plastyczności w funkcji prędkości odkształcania dla badanej stali w stanie wyżarzonym.

Wpływ prędkości odkształcenia na górną i dolną granicę plastyczności badanej stali w stanie wyżarzonym przedstawiono na rys. 17. Aproksymacja liniowa uzyskanych wyników w układzie $\log \sigma$ ($\log \dot{\varphi}$), w całym zastosowanym przedziale prędkości odkształcenia, pozwala na przyjęcie następujących zależności analitycznych:

$$\sigma_g = C_1 \dot{\varphi}^{n_g} \quad \text{i} \quad \sigma_d = C_2 \dot{\varphi}^{n_d},$$

gdzie σ_g i σ_d oznacza odpowiednio górną i dolną granicę plastyczności, C_1 i C_2 — stałe, a n_g i n_d — czułości na prędkość odkształcenia.

Wyliczone wartości n_g i n_d wynoszą odpowiednio 0,0618 i 0,0442. Są one porównywalne z wartościami 0,0677 i 0,0593 otrzymanymi w pracy [7] dla wyżarzonej miękkiej stali o zawartości węgla 0,085% i podobnej zawartości innych domieszek, odkształcanej w podobnym zakresie prędkości. Nieznaczne różnice wynikają prawdopodobnie z innej zawartości węgla w obydwu badanych materiałach. Blacha stalowa badana w obecnej pracy posiada 0,11% C. Uzyskane wyniki, znajdujące potwierdzenie w innych pracach wskazują, że przeprowadzona korekta wartości górnej granicy plastyczności na oscylogramach $P(t)$ wydaje się być w pełni poprawna.

6. Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przytoczonych wyników doświadczeń jak i przeprowadzonej dyskusji można sformułować następujące wnioski:

1. Dokonane zmiany systemu pomiarowego siły, przez wykorzystanie w nowym rozwiązaniu tensometrii elektrooporowej, okazały się prawidłowe — stwierdzono przydatność stosowania do prób dynamicznego rozciągania młota rotacyjnego typu RSO.

2. Przeprowadzona identyfikacja układu drgającego konstrukcją nośna-dynamometr-próbka przy wykorzystaniu techniki analogowej, umożliwiła prawidłową interpretację uzyskanych oscylogramów. Dzięki identyfikacji układu udało się wyznaczyć wartości naprężenia dla górnych granic plastyczności badanych stali.

3. Opisana metoda interpretacji oscylogramów na których obserwuje się proces oscylacji siły może stanowić podstawę do analizy wyników otrzymywanych na urządzeniach podobnego typu.

4. W wyniku doświadczeń na młocie rotacyjnym uzyskano krzywe umocnienia dla miedzi i stali niskowęglowej w zakresie prędkości odkształcenia od 10^1s^{-1} do około 10^2s^{-1} . Krzywe te porównywano z krzywymi umocnienia, które zostały wyznaczone dla małych prędkości odkształcenia. Otrzymane wyniki mogą być użyteczne w pewnych procesach przeróbki plastycznej.

Literatura cytowana w tekście

1. U. S. LINDHOLM, *Some Experiments with the Split Hopkinson Pressure Bar*, J. Mech. Phys. of Solids 6, 12 (1964), 317.
2. J. KLEPACZKO, *Zmodyfikowany pret Hopkinsona*, Mech. Teoret. i Stos., 4, 9 (1971), 479.
3. J. E. SMITH, *Tension Test of Metals at Strain Rates up to 200 sec⁻¹*, Mat. Res. and Standards, 9, 3 (1963), 713

4. Ю. Я. Волощенко-Климовицкий, *Динамический предел текучести*, Изд. Наука, Москва 1965 (1963), 713.
5. B. REVSIN, S. R. BODNER, *Experiments on the Dynamic Tensile Strength of Metals and Plastics*, Israel Journal of Technology, 6, 7 (1969), 485.
6. I. VIGNESS, J. M. KRAFFT, R. C. SMITH, *Proc. Conf. on Properties of Materials at High Rates of Strain*, London 1957, 138.
7. K. J. MARSH, J. D. CAMPBELL, *The Effect of Strain Rate on the Post-Yield Flow of Mild Steel*, J. Mech. Phys. of Solids, 1, 11 (1963), 49.
8. C. J. MAIDEN, S. J. GREEN, *Compressive Strain-Rate Test on Six Selected Materials at Strain Rates from 10^{-3} to 10^4 in $|in|$ sec.*, J. Appl. Mech., 3, 33 (1966), 496.
9. H. C. MANN, *High-velocity Tension-Impact Tests*, Proc. ASTM, 36 (1936), 85.
10. M. J. MANJOINE, A. NADAI, *High-Speed Tension Tests at Elevated Temperatures*, Proc. ASTM, 40 (1940), 822.
11. M. J. MANJOINE, *Influence of Rate of Strain and Temperature on Yield Stresses of Mild Steel*, J. Appl. Mech., 12, 11 (1944), A-211.
12. F. E. HAUSER, *Techniques for Measuring Stress-Strain Relations at High Strain Rates*, Exp. Mech., 8, 6 (1966), 395.
13. J. KLEPACZKO, *Urządzenie do dynamicznego skrećania*, Mech. Teoret. i Stos., 4, 5 (1967), 425.
14. K. G. HOGE, *Some Mechanical Properties of Uranium-10 Weight Percent Molybdenum Alloy Under Dynamic Tension Loads*, Trans. ASME, 87 D (1966), 509.
15. A. R. ROSENFELD, G. T. HAHN, *Numerical Description of the Ambient-Temperature and High-Strain Rate Flow and Fracture Behavior of Plain Carbon Steel*, Trans. ASM, 59, (1966), 962.
16. J. KLEPACZKO, *O potęgowej postaci mechanicznego równania stanu z uwzględnieniem temperatury*, Rozpr. Inż., 3, 13 (1965), 561.

Резюме

ИСПЫТАНИЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ УДАРНОМ РАСТЯЖЕНИИ
НА РОТАЦИОННОМ КОПРЕ

В статье представлено как следует провести ударное растяжение на ротационном копре типа RSO производства фирмы WPM Лейпциг. Обсуждено сделанные изменения измерений системы сил и скорости удара, а также проведено краткий анализ этой системы с точки зрения распространения волн.

Проведено идентификацию колеблющей системы: конструкция копра — динамометр — образец используя аналоговую вычислительную машину что дало возможность правильной интерпретации полученных осциллограммов усилие — время, а также наметить напряжения верхнего предела текучести исследуемой стали.

В результате экспериментов получено динамические кривые упрочнения для поликристаллической меди (99,90% Cu) и низкоуглеродистой стали (0,11% C) в диапазоне скоростей деформаций $10 - 10^2$ сек⁻¹. Построенные динамические кривые упрочнения этих металлов сравниваются со статическими кривыми.

Summary

DYNAMIC TENSILE TEST OF METALS BY ROTATIONAL HAMMER

It has been shown how the dynamic tensile test should be performed by means of rotational hammer RSO type, produced by WPM Leippzig. Some improvements have been described concerning measurements of force and impact velocity, as well as the wave analysis of the system.

Due to performed identification, by the analogue technique, of the system: support-dynamometer-specimen.

This enabled the correct of obtained oscillograms and the determination of values of the upper yield point.

As a result of the experiments the dynamic strain hardening curves for polycrystalline copper (99,9% Cu) and low carbon steel (0,11% C) have been obtained in the strain rate region $10-10^2\text{s}^{-1}$. The curves have been compared with those for quasi-static case.

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNOLOGII BUDOWY MASZYN
IPPT PAN
POLITECHNIKA WROCŁAWSKA
INSTYTUT TECHNOLOGII BUDOWY MASZYN

Praca została złożona w Redakcji. dnia 27 lipca 1978 roku.
