

551 — Doświadczalne metody badawcze
materiałów

39 / 1981

M. Małatyński, W. K. Nowacki, W. Oliński

OKREŚLENIE TEMPERATURY
W DYNAMICZNEJ PLASTYCZNOŚCI
METODĄ DETEKCYJ
PROMIENIOWANIA PODCZERWONEGO

P. 269

WARSZAWA 1981

<http://rcin.org.pl>

Praca wpłynęła do Redakcji dnia 11 września 1981 r.

Zarejestrowana pod nr 39/1981



57074



Na prawach rękopisu

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Nakład 170 egz. Ark. wyd. 1 . Ark. druk. 1,5.

Oddano do drukarni w listopadzie 1981 r.

Nr zamówienia **65510/81** Z - 97 .

Warszawska Drukarnia Naukowa, Warszawa,
ul. Śniadeckich 8

OKREŚLENIE TEMPERATURY W DYNAMICZNEJ PLASTYCZNOŚCI METODĄ
DETEKCYJ PROMIENIOWANIA PODCZERWONEGO

M. MALATYŃSKI^{*}, W. K. NOWACKI^{*}, W. OLIFERUK^{**}

Celem pracy jest pomiar pola temperatury powstałego w trakcie dynamicznej, plastycznej deformacji ciała z dużymi prędkościami odkształcenia, rzędu $10^2 - 10^4 \text{ s}^{-1}$. Ten zakres prędkości odkształcenia jest możliwy do realizacji jedynie w przypadku prób ściskania. Stosuje się tutaj specjalne techniki doświadczalne z wykorzystaniem urządzeń wzmacniania i rejestracji sygnału o szerokim paśmie przenoszenia.

W ciągu ostatnich kilkunastu lat można zaobserwować znaczny postęp w rozwoju badań doświadczalnych nad własnościami mechanicznymi metali w szerokim zakresie zmian prędkości deformacji i temperatur. Badania te miały na celu dostarczenie danych dla sformułowania równań konstytutywnych ważnych dla szerokiej gamy temperatur, słusznych dla różnych typów obciążeń: monotonicznych, cyklicznych, statycznych i dynamicznych oraz jednoosiowych i złożonych. Są one przeprowadzane najczęściej w stałej temperaturze w kontrolowanej atmosferze lub w próżni. Szeroki przegląd tych badań doświadczalnych można znaleźć np. w książce P. PERZYNY [11] oraz dla stali w pracy [9].

Od kilku lat zaczęły pojawiać się prace w mechanice ciał stałych, związane z określeniem zmian temperatury materiału spowodowanych jego odkształceniem. Badania te zapoczątkowało pojawienie się na rynku kamer podczerwieni dostatecznie wrażliwych na to by rejestrować zmiany "temperatury" mniejsze od $0.2 \text{ }^\circ\text{C}$. Istniejąca literatura jest jeszcze dość uboga. Należy zacytować interesujące prace z zakresu mechaniki zniszczenia [5], mechaniki drgań [12], mechaniki ciał niesprężystych [6, 4, 10] oraz wyznaczania energii zgmagazynowanej w metalu

^{*} Zakład Mechaniki Ośrodków Ciągłych

^{**} Zakład Układów Mechanicznych

podczas procesu rozciągania [7]. Prace te były wykonywane przy użyciu urządzeń termowizyjnych. Wykorzystuje się tutaj fakt, że każde ciało o temperaturze większej od zera absolutnego emituje promieniowanie podczerwone. Moc tego promieniowania wyraża się jednoznacznie funkcją temperatury emitowanej powierzchni - w myśl prawa Stefana-Boltzmana. Urządzenie termowizyjne umożliwia rejestrację powierzchniowego rozkładu mocy promieniowania emitowanego przez badany obiekt. Promieniowanie z poszczególnych obszarów emitującej powierzchni jest kolejno zbierane za pomocą układu optycznego kamery termowizyjnej i ogniskowane na powierzchni detektora. Detektor przetwarza promieniowanie podczerwone na proporcjonalny do mocy tego promieniowania sygnał elektryczny. Stosowanie detektorów przetwarzających promieniowanie podczerwone na sygnał elektryczny umożliwia dowolną obróbkę tego sygnału. Po wzmocnieniu może on być wykorzystany do modulacji strumienia elektronowego w lampie obrazowej. Na ekranie lampy otrzymuje się wówczas obraz powierzchniowego rozkładu mocy promieniowania podczerwonego emitowanego przez badany obiekt. Otrzymany rozkład można przeliczyć na rozkład temperatury. Pomiar temperatury oparty na detekcji promieniowania podczerwonego jest praktycznie bezinercyjny. Ważną jest zaletą, zwłaszcza w badaniach typu dynamicznego jest to, że układ pomiarowy nie ma bezpośredniego oddziaływania z badaną próbką.

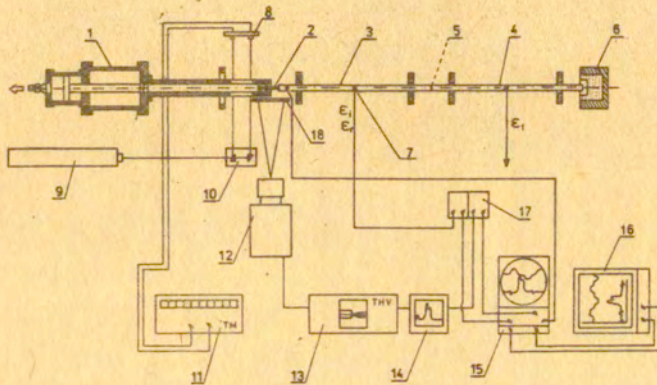
W pracy przedstawiono kolejno opis stanowiska badawczego, omówiono przebieg doświadczenia, przeanalizowano wyniki badań doświadczalnych oraz porównano je z wynikami obliczeń teoretycznych przedstawionych w pracy [1].

1. OPIS STANOWISKA BADAWCZEGO

Stanowisko badawcze do dynamicznego ściskania próbek walcowych z termowizyjną rejestracją rozkładu temperatury zostało skonstruowane w oparciu o układ zmodyfikowanego pręta Hopkinsona oraz zestaw termowizyjny AGA 680.

W układzie pręta Hopkinsona WPH 10 składającym się z

wyrzutni pneumatycznej 1 wraz z lufą /rys.1/, zestawu prętów pomiarowych 3,4 oraz hamownika 6 próbka badania będąca za-



Rys.1. Schemat stanowiska badawczego do dynamicznego ściskania próbek walcowych z termowizyjną rejestracją temperatury.

razem pociskiem 2 jest wystrzeliana ze znaczną prędkością, po czym uderza w czoło pręta pomiarowego 3, ulegając znacznemu odkształceniu. Prędkość próbki - pocisku jest mierzona przy pomocy lasera 9, którego promień zostaje rozczepiony w układzie pryzmatów 10 na dwie równoległe wiązki biegnące do fototranzystorów 8. Przecięcie pierwszej wiązki światła laserowego przez pocisk wywołuje powstanie sygnału elektrycznego na fototranzystorze, co uruchamia czasomierz liczący 11; przecięcie drugiej wiązki powoduje zakończenie pracy czasomierza.

Próbka walcowa uderzając w czynny pręt pomiarowy wywołuje w nim sprężystą falę ściskania o amplitudzie $-\epsilon_t$. Fala ta dociera do tylnego czoła pręta, gdzie umieszczono przekładkę drewnianą 5, odbija się i wraca w tym pręcie jako sprężysta fala

rozciągania o amplitudzie $-\epsilon_r$. Mocno wytłumiony impuls propaguje się również przez położony poza przekładką pręt bierny, a cały układ prętów jest hamowany w hamowniku. W połowie długości pręta czynnego umieszczono potencjometryczny układ tensometrów. Sygnał z tego układu po przejściu przez wzmacniacz 17. był rejestrowany na jednym z kanałów numerycznego oscyloskopu z pamięcią Gould Advance 15. Jego przebieg czasowy odpowiada początkowej i odbitej fali sprężystej. Podstawą czasu oscyloskopu wyzwalano sygnałem z innego, również potencjometrycznego, układu tensometrów umieszczonego na początku czynnego pręta. Dzięki temu otrzymywano "czekającą" podstawę czasu, co umożliwiało rejestrację pełnego kształtu fali początkowej i odbitej i zapewniało stały punkt odniesienia na osi czasu.

Miejsce uderzenia próbki-pocisku o czynny pręt pomiarowy było obserwowane przez kamerę 12 stanowiącą wyposażenie układu termowizyjnego typu AGA 680. Kamerę ustawiono w odległości około 300 mm od osi geometrycznej prętów i lufy w miejscu zapewniającym ostrość obrazu w płaszczyźnie detektora. Bezpośrednio przed lufą i miejscem zderzenia umieszczono cylindryczną stalową osłonę 18 z wyciętą szczeliną, zabezpieczającą kamerę termowizyjną przed ewentualnym uszkodzeniem, wskutek zniszczenia próbki. Proces deformacji próbki trwał zbyt krótko, aby towarzyszące mu narastanie temperatury można było obserwować na obrazie termowizyjnym 13. Zmianą temperatury w trakcie tego procesu wyznaczono analizując wzmocniony sygnał detektora wywołany promieniowaniem podczerwonym emitowanym z punktów powierzchni próbki leżących na linii równoległej do osi próbki, czyli analizując sygnał linii obrazu termowizyjnego. Sygnał ten obserwowano na ekranie odpowiedniej przystawki oscyloskopowej oraz rejestrowano na ekranie oscyloskopu Gould Advance.

Dwukanałowy oscyloskop numeryczny z pamięcią Gould Advance pozwala na trwałą rejestrację /zapamiętywanie/ przebiegów sygnałów elektrycznych podawanych w chwili wyzwolenia podstawy czasu. W ten sposób podczas zderzenia próbki z prętem czynnym otrzymujemy równoczesny zapis przebiegu fali sprężystej w pręcie na I kanale, oraz rozkład mocy promieniowania podczerwo-

nego wzdłuż osi próbki na kanale II. Gdy powierzchnia próbki pod względem emisyjności jest jednorodna, wówczas rozkład mocy promieniowania podczerwonego jest proporcjonalny do rozkładu temperatury.

Oscyloskop jest wyposażony w przystawkę analogowo-cyfrową, która umożliwia zapamiętanie sygnału w postaci cyfrowej. Wyprowadzenie sygnału z oscyloskopu może być realizowane bezpośrednio z pamięci cyfrowej /np: w celu podania go do drukarki/ lub poprzez układ cyfrowo-analogowy. W drugim wypadku sygnał ma postać analogową i może być podany na wejście rejestratora lub własnego oscyloskopu. Szybkość odbierania sygnału w postaci analogowej może być regulowana częstością podstawy czasu oscyloskopu. W ten sposób możliwa jest rejestracja szybkich przebiegów i odtwarzanie ich w zwolnionym tempie na typowych elektromechanicznych urządzeniach rejestrujących. W skonstruowanym układzie badawczym wykorzystano trzykanałowy rejestrator Riken Denski 16 na którym otrzymywano zapisy przebiegu fali w pręcie i temperatury próbki w chwili zderzenia.

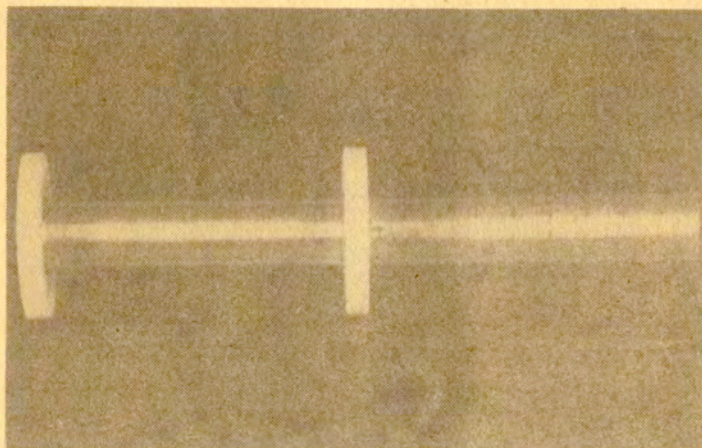
2. PRZEBIEG DOŚWIADCZEŃ

W badaniach realizowano dwa typy doświadczeń. Pierwszy z nich polegał na zderzeniu długiej próbki walcowej z układem prętów ;w drugim cienka próbka walcowa była odkształcana dynamicznie w klasycznym układzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona tj. pomiędzy dwoma prętami, z których pierwszy był uderzany stalowym prętem-pociskiem.

2.1. Przygotowanie próbek

Próbki wykonano z miękkiego stopu aluminiowego PA1. W pierwszym typie doświadczeń miały one kształt walca /rys.2/ o średnicy $d_0 \approx 9,80$ mm i długości $l_0 \approx 95$ mm, przy czym część pomiarowa próbki miała długość $l_0 = 50$ mm, natomiast część nośna była ograniczona dwoma pierścieniowymi kołnierzami teflonowymi o

grubości $t_k = 3$ mm. Kołnierze zapewniały współosiowy ruch



Rys. 2. Próbką walcową z pierścieniowymi kołnierzami teflonowymi.

próbki w lufie o większej średnicy; pierwszy z nich był osadzony na próbce suwliwie, drugi był nakręcony na gwintowaną tylną część próbki, zapewniał ponadto szczelność objętości wewnętrznej. Jednocześnie próbka przemieszczając się w lufie nie stykała się z nią swą boczną powierzchnią. Tarcie pobocznicy próbki o lufę spowodowałyby nagrzanie się powierzchni. W wyniku tego interpretacja wyników doświadczalnych nie byłaby poprawna.

W drugim typie doświadczeń próbki ze stopu Al miały kształt krótkiego walca /dysku/ o średnicy $d_0 = 10$ mm i długości $l_0 = 5$ mm. Powierzchnie boczne obu typów próbek czerniono sadzą bezpośrednio przed badaniem, w celu uzyskania lepszej emisyjności powierzchni a więc wyższego poziomu sygnałów rejestrowanych na monitorze termowizyjnym. Czoła próbek przed badaniem pokrywano cienką warstwą smaru wysokiej jakości "Rocol". Na powierzchniach bocznych próbek oznaczono rysikiem linie równoległe do czoła próbki, co 5 mm każda w celu późniejszego pomiaru trwałych deformacji podłużnych.

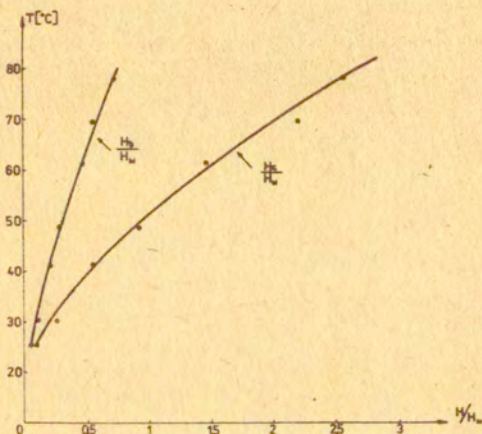
2.2. Wzorcowanie elektronicznego układu rejestracji sygnałów oraz urządzeń zapisujących

Wzorcowanie układu rejestracji impulsów przeprowadzono poprzez generację sygnału wzorcowego ze wzmacniacza tensometrycznego WT2. Sygnał ten zarejestrowany na oscyloskopie z pamięcią i rejestratorze x - y odpowiada odkształceniom z tensometrów wynoszącym $\varepsilon = 0,001$. Dokonano także ustalenia poziomu czułości pracy i skalowania rejestratora x-y tak by rysowane przebiegi mieściły się w formacie wykresu.

2.3. Wzorcowanie układu pomiaru temperatury

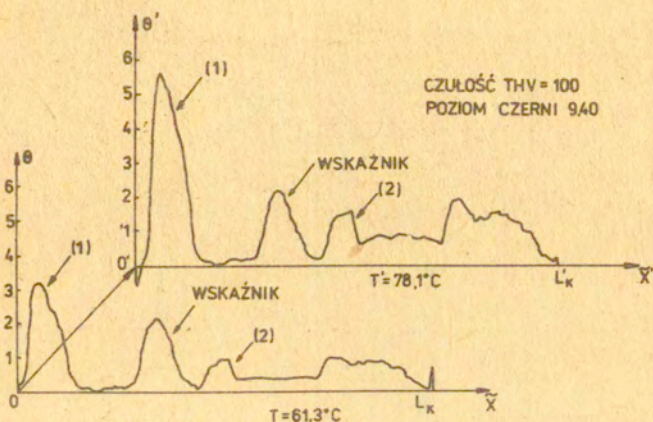
Sygnał na wyjściu detektora jest funkcją różnicy temperatur badanego obiektu i obszaru tuż przy obiekcie. Temperatura tego obszaru zmienia się w sposób niekontrolowany, co utrudnia wyznaczenie temperatury próbki. Aby rozwiązać ten problem w pole widzenia kamery wprowadzono wskaźnik stałej temperatury. Był to drut oporowy zasilany stabilizowanym prądem. W ten sposób każdy zarejestrowany zapis rozkładu temperatury próbki podczas jej zderzenia z prętem był poprzedzony pewnym maksimum, którego źródłem było promieniowanie emitowane przez drut o stałej temperaturze. Wartość temperatury drutu nie musiała być znana. Służyła ona jedynie jako stały poziom odniesienia. W celu określenia zależności między temperaturą próbki a mocą emitowanego przez nią promieniowania, a więc w celu wyznaczenia bezwzględnej wartości temperatury próbki w jej miejsce umieszczono niewielki zbiornik połączony z ultratermostatem zapewniającym kontrolowaną regulację temperatury. Temperatura powierzchni zbiornika, nawet po ustaleniu się równowagi termicznej, może różnić się od temperatury wody w ultratermostacie. Dlatego oprócz pomiaru temperatury wody mierzono za pomocą termopary temperaturę powierzchni zbiornika. Powierzchnia boczna zbiornika, wykonanego z takiego samego materiału jak materiał próbki była w połowie /mierzonej wzdłuż osi zbiornika/ o barwie naturalnej, natomiast w połowie zaczerniona. Pozwoliło to na określenie

zależności emisyjności od temperatury zarówno dla powierzchni jasnej jak i zaczernionej. W wyniku takiego postępowania otrzymano dwa wykresy $T = f(H_b/H_w)$ i $T = f(H_c/H_w)$ pokazane na rysunku 3, gdzie H - wysokość rejestrowanego w układzie

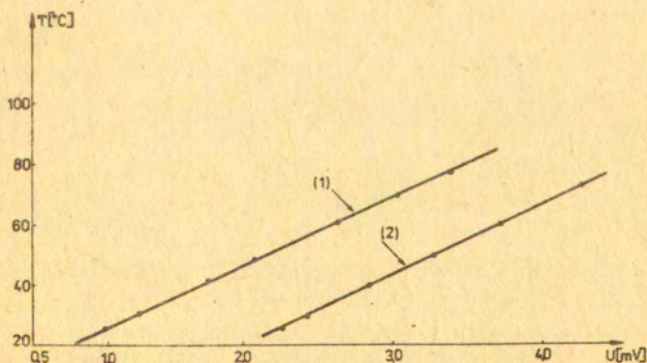


Rys.3. Zależność temperatury od stosunku mocy promieniowania podczerwonego zbiornika aluminiowego do mocy promieniowania wskaźnika. H - wysokość rejestrowanego w układzie termowizyjnym maksimum rozkładu temperatury /indeksy w, b, c oznaczają odpowiednio: wskaźnik, powierzchnia biała, powierzchnia czarna/.

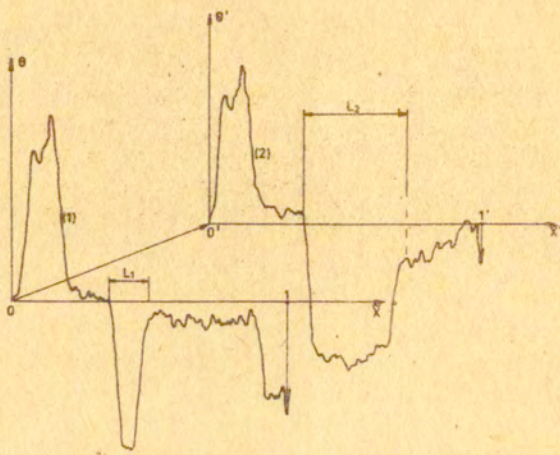
termowizyjnym maksimum rozkładu temperatury a indeks w, b, c oznacza wskaźnik, powierzchnię naturalną /białą/ oraz czarną /rys.4/. Wzorcowanie termopary przeprowadzono zanurzając ją wraz ze zbiornikiem w ultratermostacie. Otrzymane przebiegi $T = f(U)$, gdzie: U - napięcie na zaciskach termopary, zarówno przy zasilaniu zbiorniczka wodą z ultratermostatu, jak i przy zanurzeniu termopary wraz ze zbiorniczkiem w ultratermostacie, charakteryzowały się dobrą liniowością /por.rys.5/. Dla przyporządkowania zarejestrowanych rozkładów temperatury określonym obiektom fizycznym /próbce, prętowi czynnemu/ rejestrowano także termograficzny obraz końca nieznacznie ogrzanego pręta w dwóch położeniach: położeniu pracy oraz po wysunięciu go o określoną odległość /rys.6/. Obraz termograficzny końca



Rys. 4. Rejestracja promieniowania zbiorniczka aluminiowego dla dwóch różnych temperatur oraz promieniowania wskaźnika: /1/ promieniowanie powierzchni czarnej zbiornika, /2/ promieniowanie części białej /naturalnej/ zbiornika aluminiowego.



Rys.5. Zależność temperatury od mierzonego ciśnienia /naprężenia na zaciągach termopary: /1/ temperatura cieczy przepływającej przez zbiornik, /2/-temperatura zbiornika zanurzonego w ultratermostacie.



Rys. 6. Rejestracja termograficznego obrazu końców podgrzanych prętów układu pomiarowego: /1/- odległość między prętami L_1 ; /2/- odległość między prętami L_2 .

pręta oraz wskaźnika usytuowanego w stałym miejscu pozwolił na przyporządkowanie zarejestrowanych przebiegów fizycznej konfiguracji obiektów w miejscu zderzenia.

2.4. Badania zderzenia ze sztywną przegrodą wykonane na długich próbkach walcowych.

Wykonano dwie serie badań, w pierwszej 20 próbek, w drugiej 10. Próbki pociski umieszczano w głębi lufy przy pomocy specjalnego wyciora. Komory argonowej wyrzutni pneumatycznej napełniano czynnikiem roboczym pod ciśnieniem od 4 do 8 at. Umożliwiło to osiągnięcie prędkości uderzenia próbki w zakresie $50-150 \text{ ms}^{-1}$. Odpowiednią czułość układu termowizyjnego dobierano drogą prób, przy osiągniętych prędkościach uderzenia wynosiła ona 20 dla próbek o barwie naturalnej oraz 100 dla próbek zaczernionych. Wskaźniki 20 i 100 oznaczają stopień podziału sygnału na wyjściu wzmacniacza. / Przy 20 krotnym podziale sygnału czułość układu termowizyjnego jest 5 razy większa niż przy 100 krotnym./

Czułość kanału oscyloskopu numerycznego Gould Advance była w zasadzie stała, wynosiła 0.1mV na działkę dla kanału rejestrującego, rozkład mocy promieniowania próbki podczas zderzenia 1 0.5 lub 0.2 mV na działkę dla kanału zapisującego przebieg fali sprężystej w pręcie pomiarowym. Skala podstawy czasu w oscyloskopie wynosiła 0.1 ms cm⁻¹ celem uzyskania następujących po sobie sekwencji przebiegu temperatury próbki oraz większej liczby przebiegów fal podniesiono ją w kilku badaniach do 0.2 a nawet 0.5 mscm⁻¹.

W pierwszej serii badań jako układ pomiarowy prędkości użyto dwóch par oświetlaczy-fototranzystorów umieszczonych w odpowiedniej obudowie osadzonej wprost na lufie. Przecinanie dwóch wiązek światła, przez pocisk poruszający się w lufie wyzwalało sygnały "start" i "stop" czasomierza liczącego. Układ ten okazał się jednak niepewny, gdyż prawdopodobnie propagująca się w materiale lufy w chwili wystrzału fala sprężysta powodowała wyzwolenie elektryczne fototranzystorów. Dlatego w drugiej serii badań użyto lasera, natomiast układ pryzmatów kierujących wiązki światła lasera oraz fototranzystory oddalono znacznie od osi lufy i prętów pomiarowych.

2.5. Doświadczenia w układzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona przeprowadzone na krótkich próbkach walcowych.

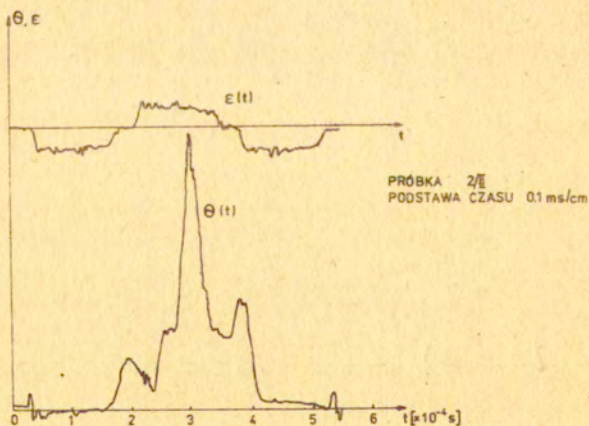
Badania na krótkich próbkach walcowych przeprowadzono w klasycznym układzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona opisanym szczegółowo w pracach 3, 8. Kameralną termowizyjną wraz z osłoną umieszczono naprzeciw próbki znajdującej się pomiędzy dwoma prętami roboczymi. Powierzchnia boczna próbki była barwy naturalnej, powierzchnie kontaktu z prętami pokryte cienką warstwą smaru "Rocal"; próbkę umieszczono pomiędzy prętami współosiowo, za pomocą specjalnego przyrządu. Dynamiczną deformację próbki uzyskiwano poprzez/ wystrzał / uderzenie pręta - pocisku o długości $l_p = 200$ mm i średnicy $d_p = 20$ mm w układ prętów pomiarowych z próbką. Ze względu na znaczną masę pręta-pocisku komory wyrzutni napełniono pod ciśnieniem $p = 3 + 4$ at,

co pozwoliło uzyskać prędkości uderzenia pocisku od 6 ms^{-1} do 23 ms^{-1} . W układzie zapisującym /oscyloskop numeryczny, rejestrator x-y/ rejestrowano przebiegi mocy promieniowania podczerwonego emitowanego przez powierzchnię boczną próbki i fali sprężystej w pręcie czynnym. Nie rejestrowano przebiegu fali w pręcie transmitującym. Czułość kanałów oscyloskopu oraz podstawa czasu były jak w badaniach na długich próbkach walcowych. Czułość układu termowizyjnego wynosiła 20.

3. WYNIKI BADAŃ DOŚWIADCZALNYCH

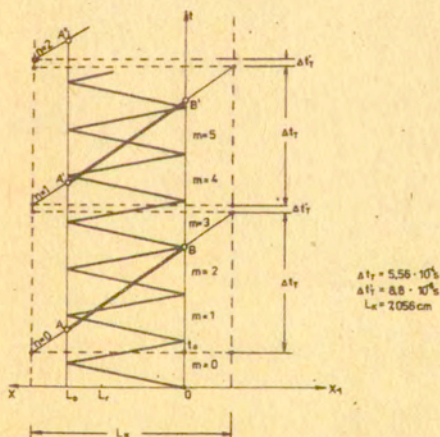
3.1. Wyniki badań zderzenia próbki z prętem odbierającym.

Jako rezultat każdego z badań na długich próbkach walcowych otrzymano na wspólnym wykresie zdjęte z oscyloskopu numerycznego przebiegi fali sprężystej w pręcie czynnym $\epsilon(t)$ oraz rozkład mocy promieniowania $\Theta(t)$ w polu obserwacji kamery termowizyjnej obejmującym wskaźnik, próbkę i czoło pręta /rys.7/. Przebieg fali sprężystej obejmuje kolejno powtarzają-



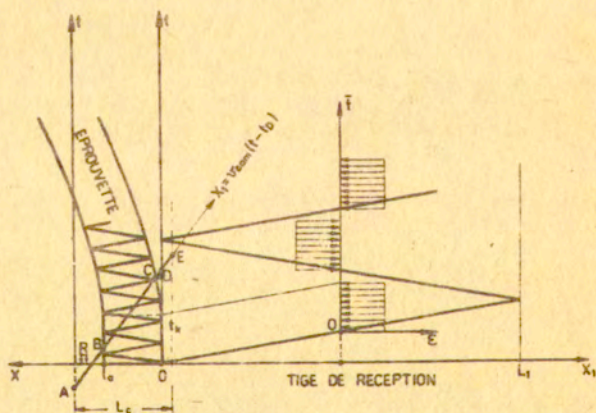
Rys.7. Przebieg fali sprężystej w pręcie czynnym $\epsilon(t)$ oraz rozkład mocy promieniowania $\Theta(t)$ w polu obserwacji kamery termowizyjnej.

-ce się sekwencje fal ściskania i rozciągania, których kształt odpowiada w przybliżeniu kształtowi trapezu z nałożonymi nań zaburzeniami. Po kilku cyklach ściskanie-rozciąganie kształt fali charakteryzuje się znacznym obniżeniem amplitudy i zaburzeniami wywołanymi przez tłumienie przekładki oraz tłumienie wewnętrzne pręta, odbiegając znacznie od kształtu trapezu. Moc promieniowania obiektu obserwowanego przez kamerę zmienia się, zarówno w czasie, jak i przestrzeni. Zasada pracy kamery termowizyjnej w realizowanych doświadczeniach polega na obserwacji kolejnych punktów wybranej linii obiektu przy pomocy obracającego się pryzmatu. Po jednym cyklu obserwacji linii o długości $L_k = 7.056$ cm od lewej do prawej; którego czas wynosi $t_T = 5.56 \cdot 10^{-4}$ s, następuje przeskok /obrót/ pryzmatu o czasie trwania $\Delta t_T = 8.8 \cdot 10^{-6}$ s i kolejny cykl obserwacji. Zasadę pracy kamery termowizyjnej w obecnym doświadczeniu przedstawiono na rys. 8. Jest to wykres $t(x)$, z początkiem



Rys.8. Schemat obrazów rejestrowanych przez kamerę termowizyjną.

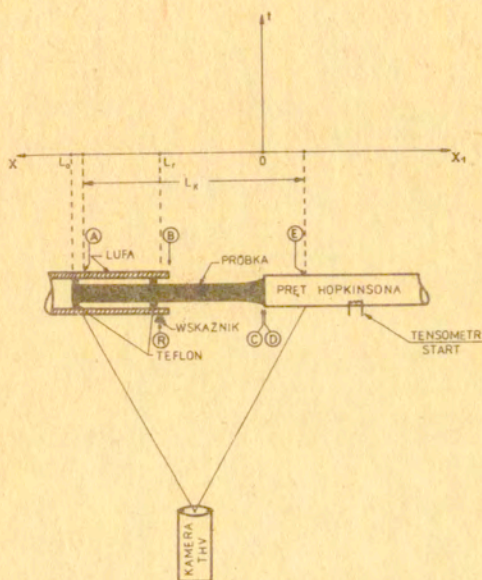
układu współrzędnych umieszczonym na brzegu pręta. Przerwanymi rzędnymi ograniczono zakres obserwacji kamery termowizyjnej, pary linii półgrubych odpowiadają cyklom $m = 0, 1, 2, 3 \dots k$ przejść fali silnej nieciągłości przez próbkę, natomiast proste $n = 0, 1, 2, 3, \dots, l$ wyznaczają punkty powierzchni (X, t) , dla których jest rejestrowana moc promieniowania emitowanego przez obiekt. Ponieważ kamera nie jest wyzwalana w momencie zderzenia, lecz pracuje stale, w chwili rozpoczęcia procesu zderzenia obserwuje ona naogół pewien dowolny punkt wzdłuż długości L_k . Dopiero po zakończeniu tego cyklu obserwacji, tj. w chwili t_0 , rozpoczyna ona nowy, pełny zapis mocy promieniowania całej linii L_k . Możemy rejestrować promieniowanie podczerwone powierzchni próbki /jej tworzącej/ z opóźnieniem w funkcji czasu. Rejestrujemy promieniowanie na linii $X_1 = v_{kam} \cdot (t - t_D)$ /rys.9/, gdzie v_{kam} jest prędkością "omiatania" kamery wzdłuż wybranej linii poziomej odpowiadającej tworzącej próbki cylindrycznej.



Rys. 9. Obraz propagacji fal w próbce i w przecie odbierającym. Rejestracja mocy promieniowania podczerwonego odbywa się wzdłuż linii AE.

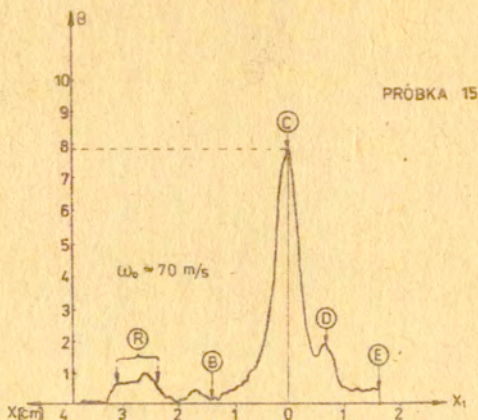
Na rysunku tym przedstawiono obraz propagacji fal w próbce i w przecie odbierającym na płaszczyźnie fazowej (X, t) , po uderzeniu.

Punkty A, B, C, D, E i R odpowiadają odpowiednim punktom na rysunku 10. Czas t_k odpowiada chwili oderwania się próbki od pręta.



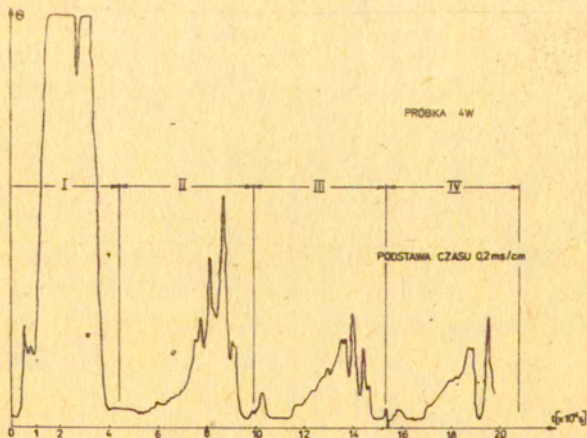
Rys. 10. Pole obserwacji kamery termowizyjnej.

Na wykresie zależności $\Theta(x_1)$ pełen cykl obserwacji jest zawarty między dwoma punktami zmiany znaku przebiegu. W prowadzonych badaniach tj: w zakresie prędkości pocisku $v \approx 10^2 \text{ ms}^{-1}$ oraz dla powierzchni zaczernionej /jej emisyjność jest w przybliżeniu 5 razy większa od emisyjności powierzchni o barwie naturalnej/ na wykresie $\Theta(x_1)$ można wyróżnić trzy maksima - rys. 11. Pierwsze od lewej, mało wybitne jest wynikiem promieniowania cieplnego drucików grzewczych wskaźnika /punkt R/, drugie najbardziej wybitne odpowiada końcowi pręta-pocisku /punkt C/, natomiast trzecie końcowi pręta roboczego /punkt D/, obydwóm rozgrzanym w chwili zderzenia. Przykładowym wykresem



Rys. 11. Typowy przebieg mocy promieniowania próbki w funkcji X_1 .

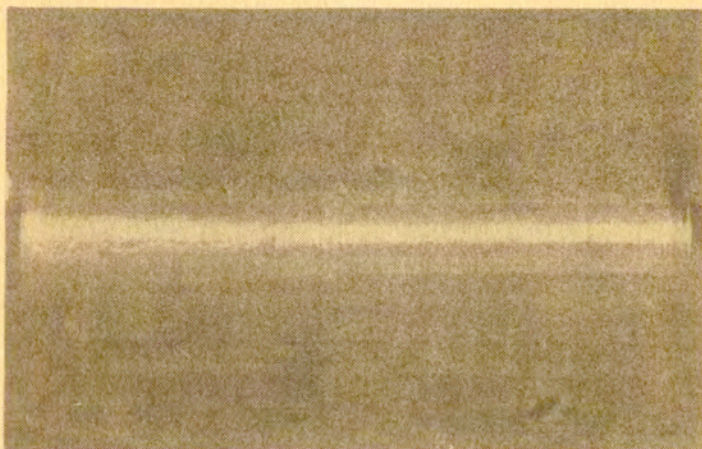
tego typu będącym rejestracją przebiegu $\theta(X_1)$ /dla próbki Nr.15/ jest wykres na rysunku 11. Otrzymane wyniki dla obu serii próbek należy uznać za powtarzalne. Poprzez zmianę częstotliwości podstawy czasu oscyloskopu można uzyskać zapis dwóch lub więcej czasowych sekwencji mocy promieniowania z miejsca zderzenia, obserwowanego przez kamerę od lewej do prawej. Przykładowy zapis kolejnych 4 sekwencji rozpoczynających się co $\Delta t_p + \Delta t_p^i = 5.65 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ przedstawiono na rys. 12.



Rys.12.

Pierwsze maksima nie zmieściły się w całości na ekranie oscyloskopu, dalsze sekwencje II i III charakteryzują się zmniejszeniem maksimów, ale wyraźnym podobieństwem przebiegów. Gwałtowny spadek temperatury jest spowodowany utratą ciepła końców pręta i próbki przez przewodnictwo i promieniowanie.

Z rejestracji odkształcenia $\varepsilon(t)$ w pręcie czynnym /por. rys.7/ możemy określić deformację i naprężenie na kontakcie próbki i pręta /zakładając, że pręt czynny jest sprężysty/. Możemy również określić czas kontaktu próbki z prętem t_k . Następnie po przeprowadzonym doświadczeniu mierzymy odkształcenia trwałe próbki: podłużne Δ_{11} i poprzeczne Δ_{22} . Na rys.13 przedstawiono widok długiej próbki cylindrycznej po



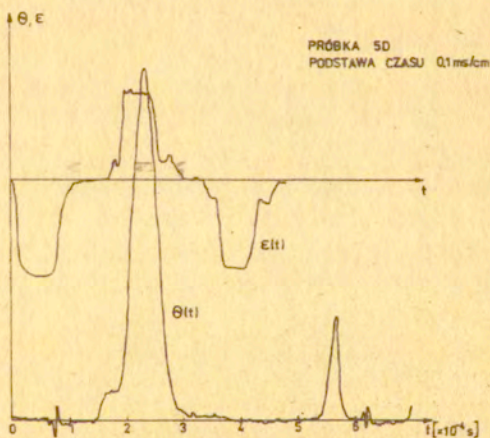
Rys.13. Próbka po deformacji.
deformacji.

3.2. Wyniki otrzymane z doświadczeń w układzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona.

Badania te różniły się od badań w schemacie zderzenia ze sztywną przegrodą jedynie kształtem próbki i sposobem uzyskiwa-

nia z niej deformacji plastycznej. Zamiast długiej próbki-pocisku wystrzeliwanego z wyrzutni, stosowano cienką próbkę walcową umieszczoną pomiędzy dwoma prętami sprężystymi, deformowaną przy pomocy trzeciego pręta-pocisku uderzającego w układ prętów roboczych. Bez zmian pozostał układ zapisujący oraz rejestrowane wielkości fizyczne. Dwukanałowy oscyloskop numeryczny pozwolił na rejestracje dwóch przebiegów, podobnie jak poprzednio: mocy promieniowania powierzchni /linii/bocznej próbki oraz przebiegu fali $\epsilon_i(t)$ w pręcie podającym. Brak odpowiedniego oscyloskopu numerycznego z trzecim kanałem pracy uniemożliwił rejestrację fali $\epsilon_t(t)$ transmitowanej przez pręt odbierający, po przejściu przez deformowaną próbkę.

Jako wyniki badań otrzymano zdjęte z oscyloskopu przebiegi $\theta(t)$ i $\epsilon_i(t)$. Przykładowy wynik tego rodzaju uzyskany dla próbki 5D pokazano na rys.14. Przebieg fali ściskania

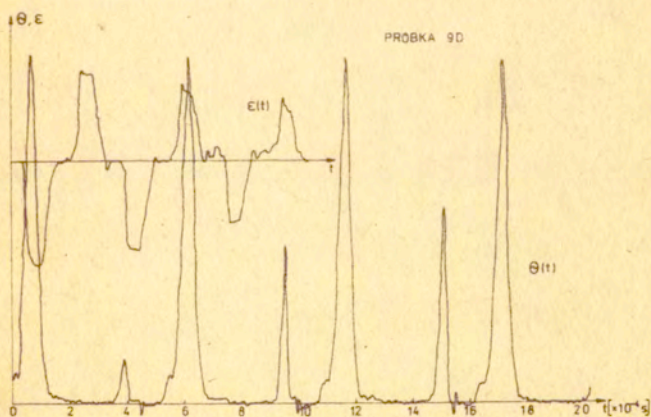


Rys.14. Deformacja $\epsilon(t)$ w pręcie Hopkinsona i moc promieniowania powierzchni próbki $\theta(t)$.

$\epsilon_i(t)$ i odbitej od czoła próbki fali rozciągania $\epsilon_r(t)$ odpowiada swym kształtem w przybliżeniu kształtowi trapezu. Pozwala to na wykorzystanie dynamicznego cechowania układu, w którym przez pomiar prędkości uderzenia pocisku v_p

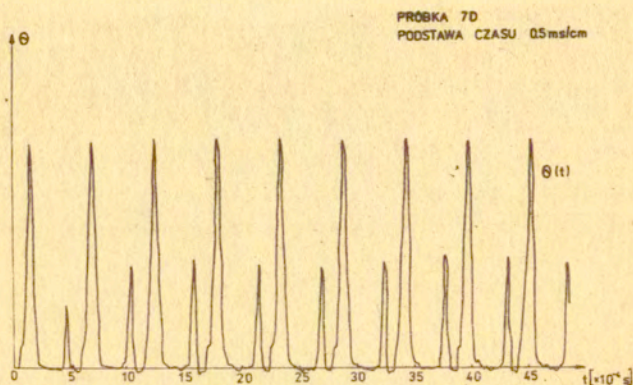
możemy wyznaczyć maksymalną wartość odkształcenia dla fali $(\epsilon_r)_{max} = \sqrt{2}c_0$. Takie postępowanie wiąże się ze sobą bezpośrednio wielkości fizyczne /odkształcenie/ i wielkości elektryczne z sygnałów tensometrów /amplituda przebiegu/, rejestrowane na wykresie. Jakościowo jest także podobny rozkład mocy promieniowania podczerwonego rejestrowanego przez system termowizyjny. Niewielkie prędkości wystrzału pręta-pocisku, ograniczone wytrzymałością prętów roboczych oraz mała masa próbki powodują, że moc promieniowania emitowanego przez jej powierzchnię jest znacznie mniejsza od mocy promieniowania pochodzącego od drucików grzejnych wskaźnika. Rozkład mocy promieniowania w pojedynczej sekwencji obserwacji kamery ma więc postać wybitnego piku /wskaźnik/ oraz pojedynczego znacznie mniejszego maksimum, odpowiadającego promieniowaniu próbki.

Na rys. 15. pokazano wyniki otrzymane dla próbki 9D. Dwukrotne zwiększenie okresu podstawy czasu oscyloskopu umożliwiło zarejestrowanie trzech kolejnych sekwencji promieniowania próbki podczas jej deformacji.



Rys. 15. Deformacja $\epsilon(t)$ w pręcie Hopkinsona i moc promieniowania powierzchni próbki $\theta(t)$.

Na rys.16 przedstawiającym moc promieniowania próbki 7D przy jeszcze dłuższym okresie podstawy czasu zarejestrowano 8 kolejnych sekwencji.



Rys.16. Dwukrotne wydłużenia okresu podstawy czasu oscyloskopu względem zarejestrowanego obrazu na rys.15.

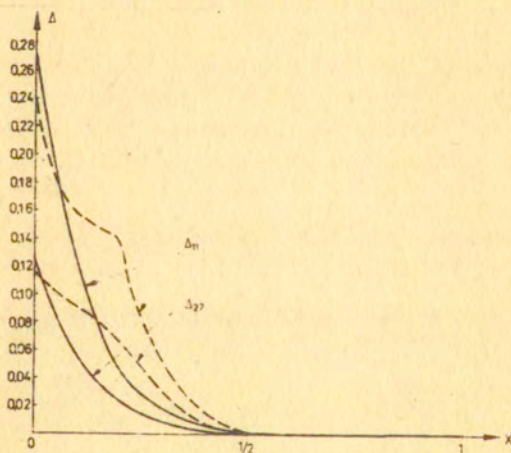
Z wykresów tych widać, że dla prędkości uderzenia pocisku $v_p \approx 20 \text{ms}^{-1}$ temperatura w próbce narasta w czasie około $2 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ /trzy kolejne sekwencje/, przy czym przez czas $3 \cdot 10^{-3} \text{ s}$ pozostaje w przybliżeniu stała.

4. ANALIZA WYNIKÓW DOŚWIADCZALNYCH, PORÓWNANIE Z OBLICZENIAMI TEORETYCZNYMI.

W pracy [2] przedstawiono pewne rozważania na temat energii zmagazynowanej w metalu /monokryształy i polikryształy/. Ograniczono się do małych odkształceń ośrodka. Na przykładzie pręta sprężysto-lepkoplastycznego poddanego obciążeniom quasi-statycznym i dynamicznym przeprowadzono analizę wpływu kilku hipotez odnośnie równania termodynamiki na powstałe w trakcie deformacji ciała pole temperatury. Identyczny problem, dla

przypadku skończonych deformacji, opierają się na teorii, która pomija efekty bezwładności poprzecznej próbki, lecz uwzględniającej rozszerzalność poprzeczną próbki, rozwiązano w pracy [1]. W oparciu o metodę charakterystyk rozwiązano zagadnienie początkowo-brzegowe dla warunków brzegowych i początkowych, identycznych jak w przeprowadzonym doświadczeniu dla długich próbek. Dane liczbowe przyjęto zbliżone do danych dla próbek realizowanych w doświadczeniu.

Na rys. 17. przedstawiono porównanie obliczonych trwałych deformacji podłużnych próbki Δ_{11} i deformacji poprzecznych Δ_{22} /dla ustalonego czasu/ z odpowiednimi deformacjami zmierzonymi na próbkach po ich odkształceniu /próbka Nr 15, której rozkład mocy promieniowania podczerwonego przedstawiono na rys. 11/. Maksymalne wartości odkształceń występują na brzegu

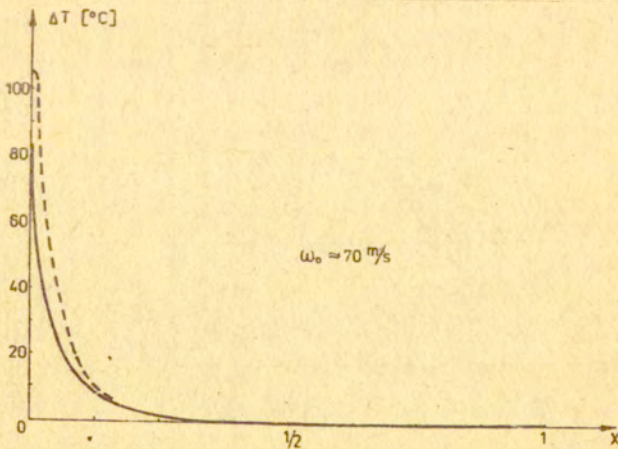


Rys.17. Deformacje trwałe próbki: Δ_{11} deformacje podłużne, Δ_{22} - deformacje poprzeczne. _____ obliczone, -----zmierzone.

badanej próbki. Można zaobserwować zgodność deformacji maksymalnych obliczonych i zmierzonych. Różnice w deformacjach zmierzonych i obliczonych w całym obszarze trwałych odkształceń można wytłumaczyć faktem pominięcia w prawie konstytutywnym członu

opisującego deformacje natychmiastowe - por [1]. Ograniczenie to powoduje /z punktu widzenia matematycznego/, że w rozważanym ciele propagują^{się} jedynie zaburzenia z prędkościami fal sprężystych. Nie istnieją natomiast fale plastyczne. Wyniki przeprowadzonego doświadczenia wskazują wyraźnie na fakt, że w rozważaniach teoretycznych dotyczących długich próbek deformowanych dynamicznie, z materiałów wrażliwych na prędkość odkształcenia, konieczne jest uwzględnienie oprócz deformacji typu relaksacyjnego również deformacji natychmiastowych. Zagadnienie to będzie przedmiotem odrębnej pracy.

Na rys.18 przedstawiono linią przerywaną zmianę przyrostu temperatury ΔT wzdłuż badanej próbki Nr 15 /wzdłuż prostej $X_1 = v_{kam}(t - t_D)$ por.rys.9/. Rozkład mocy promieniowania podczerwonego wzdłuż próbki został przedstawiony na rys.11. Po przeprowadzeniu dodatkowej procedury, wykorzystując związek H/H_w i T zobrazowany na wykresie 3, obliczono przyrost temperatury wzdłuż długości próbki. Na tym samym rysunku linią ciągłą zaznaczono obliczony drogą rozwiązania numerycznego postawionego zagadnienia początkowo-brzegowego przyrost temperatury /również wzdłuż linii $X_1 = v_{kam}(t - t_D)$. Prędkość :



Rys.18. Przyrost temperatury wzdłuż badanej próbki-wzdłuż linii $X_1 = v_{kam}(t - t_D)$ — obliczony, ———— zmierzony.

uderzenia próbki w obu przypadkach była prawie identyczna. Rozbieżność rozwiązań numerycznego od wyników pomiaru można również tłumaczyć pominięciem w rozważaniach teoretycznych plastyczności natychmiastowej. Doświadczalnie otrzymano większe wartości przyrostu temperatury oraz większa jest strefa nagrzanego czoła próbki.

W przeprowadzonych doświadczeniach zaobserwowano dużą powtarzalność wyników, zarówno dla próbek długich jak też i dla krótkich próbek cylindrycznych. Jednakże ilość przeprowadzonych badań- 30 próbek długich w schemacie zderzenia ze sztywną przegrodą oraz 12 krótkich próbek walcowych w układzie zmodyfikowanego pręta Hopkinsona nie pozwala na szerszą interpretację wyników natury globalnej, jak np: przedstawienie pełnej zależności przyrostu temperatury próbki od prędkości deformacji, deformacji trwałych próbki itp. Przeprowadzono doświadczenia pozwalają na przeprowadzenie analizy jakościowej zjawiska i wyciągnięcie wniosków odnośnie opisu matematycznego deformacji dynamicznej w zakresie dużych odkształceń i sprzężonych równań termoplastyczności.

Literatura

1. W.K.NOWACKI, T.KURCYK, Sur le champ des températures en thermo-élastoviscoplasticité finie, Journal de Mécanique Appl. et Théoret., 1, 1, 1982 /w druku/.
2. W.K.NOWACKI, J.ZARKA, Sur le champ des températures obtenues en thermoélastoviscoplasticité, Arch.Mech.Stos., 4, 26, 1974, pp.701-715.
3. J.KLEPACZKO, Zmodyfikowany pręt Hopkinsona, Mech.Teoret.i Stos., 4, 2, 1971.
4. B.NAYROLES, R.BOUC, H.CAUMON, J.C.CHEZEAUX, E.GIACOMETTI, Thermographie infrarouge et mécanique des structures, Int.Journ. of Engin.Sci., /w druku/.
5. J.A.CHARLES, F.APPL, J.E.FRANCIS, Ttermographie determination of fatigue damage, Trans, ASME, 100, 1978.

6. C.SAIX, Plasticité expérimentale par thermographie de surface, Uniwersytet w Montpellier, praca doktorska, 1978.
7. S.P.GADAJ, E.GAŁKOWSKA, J.KACZMAREK, W.OLIFERUK, Wyznaczenie energii zmagazynowanej w metalu podczas procesu rozciągania, Prace IPPT, 1981 /w druku/.
8. M.MALATYNSKI, Badania własności plastycznych ołowiu w szerokim zakresie prędkości odkształcenia wraz z uwzględnieniem efektów bezwładnościowych, IPPT, Warszawa, 1980.
9. J.ZARKA, J.CASIER, J.J.ENGEL, Influence de la température sur le comportement mécanique des aciers, Industrie Minérale, 15.III.1977.
10. R.BOUC, J.C.CHEZEAUX, E.GIACOMETTI, B.NAYROLES, Répérage et estimation des sources de chaleur par thermovision, Journal de Mécanique, 1981 /w druku/.
11. P.PERZYNA, Termodynamika materiałów niesprężystych, Warszawa, PWN, 1978.
12. A.CAGNASSO, G.CANEVET, Y.JULLIEN, R. AMALRIC, Application de la thermovision à la mécanique vibratoire: vibrations de membranes et de plaques, Revue d'Acoustique, 2, 1977.