



O osobliwościach nominalnego odkształcenia ściskania w porowatym ciągliwym pręcie po teście Taylora

EDWARD WŁODARCZYK, MARCIN SARZYŃSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Mechatroniki i Lotnictwa,
00-908 Warszawa, ul. gen. S. Kaliskiego 2,
edward.wlodarczyk@wat.edu.pl, marcin.sarzyński@wat.edu.pl

Streszczenie. W pracy przedstawiono prosty, eksperymentalny model określania bieżącego i średniego odkształcenia ściskania, $\varepsilon_r(x)$ i ε_a , w porowatym ciągliwym pręcie odkształconym plastycznie podczas testu Taylora. Wykryto, że w osiowym rozkładzie odkształcenia $\varepsilon_r(x)$ (x — współrzędna Lagrange'a) występują dwie osobliwości:

1. Maksimum odkształcenia bieżącego, $\varepsilon_{r,max}$, położone jest w bliskim otoczeniu uderzającego końca pręta, a nie w płaszczyźnie zderzenia, jak publikuje się do tej pory w literaturze.
2. Maksymalna wartość odkształcenia ε_{max} przy dużych obciążeniach maleje ze wzrostem początkowej porowatości materiału pręta, odwrotnie niż w statyce. Przyczyny wymienionych zjawisk opisano w czwartej części pracy. Średnie odkształcenie, ε_a , w zakresie niskiej i średniej porowatości praktycznie nie zależy od jej poziomu i jest limitowane wartością prędkości uderzenia.

Mając na uwadze powyższe fakty, można uważać, że praca ma wartości aplikacyjne i poznawcze.

Słowa kluczowe: metale porowate, dynamiczne odkształcenie ściskania, bezpośredni eksperyment uderzeniowy Taylora

1. Wprowadzenie

Uderzeniowy test Taylora [1] jest użytecznym eksperymentem dla określania mechanicznych właściwości materiałów ciągliwych w warunkach dynamicznych obciążeń. Jest powtarzalny i rozsądnie ekonomiczny, po wykonaniu wstępnej inwencji. Z tego powodu powszechnie stosowano go do określania dynamicznej granicy plastyczności litych materiałów stałych [2-5]. Jednak należy zwrócić uwagę na fakt, że opracowany przez Taylora teoretyczny model stosowany do matematycznego opisu

wyników udarowego eksperymentu oparty jest na daleko idących uproszczeniach, sprzecznych z falową naturą zjawisk zachodzących w pręcie (pocisku) podczas procesu uderzenia. Mankamenty tego modelu przedstawiono w pracach [6] i [7].

W teoretycznym modelu Taylora założono między innymi, że materiał pocisku jest nieściśliwy. Takim uproszczeniem można aproksymować lite metale. Ważną grupę w technicznych zastosowaniach stanowią spiekane materiały porowate. Charakteryzują się one wysoką pojemnością pochłaniania energii podczas obciążeń udarowych. Z tego powodu znalazły szerokie zastosowanie między innymi w przemyśle zbrojeniowym. Charakterystyczną cechą tych materiałów jest istotny wzrost gęstości wraz ze wzrostem odkształcenia podczas ściskania, zatem nie można zakładać ich nieściśliwości w procesie zderzenia.

W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania bezpośredniego udarowego eksperymentu Taylora do doświadczalnego określania rozkładu dyskretnych wartości nominalnego odkształcenia ściskania w porowatym pręcie ściśliwym odkształconym plastycznie podczas procesu zderzenia. Rozkład przedstawiono w funkcji współrzędnej Lagrange'a, x , skierowanej wzdłuż osi pręta z początkiem w płaszczyźnie zderzenia. W pracy zbadano również wpływ prędkości uderzenia i początkowej porowatości spieku na średnie nominalne odkształcenie plastyczne ściskania w pręcie po teście Taylora.

2. Charakterystyka procesu przygotowania próbek

Do wytworzenia porowatych próbek miedzi zastosowano technologię metalurgii proszków. Jest ona dogodna w procesie doboru ciśnień zagęszczania wyprasek przy wytwarzaniu różnych poziomów porowatości próbek. Próbki preparowano z elektrolitycznego proszku miedzi typu ECu1 o ziarnistości 40 μm . Proszek poddano redukcji (500°C, 1 h, atmosfera zdysocjowanego amoniaku) w celu usunięcia tlenków z powierzchni ziaren.

Wypraski w kształcie walca wykonano za pomocą form z elastycznego PCV. Wymiary form (średnica wewnętrzna i długość) dobrano z uwzględnieniem procesu zagęszczania proszku podczas prasowania oraz skurczu wypraski przy spiekaniu. Formy napełniano na wytrząsarce, FRITSCH Analysette 3, w celu usunięcia z objętości proszku przypadkowych pustek i uzyskania maksymalnie możliwej jednorodnej gęstości w całej formie. Zwiększa się tym samym prawdopodobieństwo otrzymania prostych wyprasek w procesie prasowania.

Wypełnione proszkiem formy prasowano izostatycznie na zimno (CIP — *Cold Isostatic Pressing*) za pomocą prasy izostatycznej firmy National Forge, z ciśnieniami: 100, 150, 200, 250 i 300 MPa. Średnią gęstość wyprasek określano metodą hydrostatyczną.

Spiekanie wyprasek przeprowadzono w piecu firmy LEW w atmosferze zdyso-cjowanego amoniaku w trzech etapach: 0,5 h, 300°C; 0,5 h, 650°C; 1 h, 950°C. Z tych wyprasek po spiekaniu wykonano, przy użyciu tokarki sterowanej numerycznie CBKO TPS20N, próbki walcowe o nominalnych wymiarach: średnica $D = 12$ mm, długość $L = 60$ mm. Powierzchnie czołowe próbek wyszlifowano w taki sposób, aby ostateczna ich faktura miała postać koncentrycznych okręgów. Zapewnia to optymalny rozkład siły tarcia podczas zderzenia próbki z tarczą, co korzystnie wpływa na równomierne odkształcenie radialne.

Do dokładnych pomiarów średnicy oraz długości próbek wykorzystano mikromierz elektroniczny firmy Mitutoyo oraz czujnik przemieszczenia firmy Sylvac; dokładność obydwu przyrządów wynosi 0,001 mm. Metodą hydrostatyczną, z użyciem wagi laboratoryjnej Axis AD200 (działka 0,001 g), wyznaczono również średnią początkową gęstość każdej próbki, ρ_{0p} .

Następnie na pobocznicach próbek wykonano znaczniki. Użyto do tego celu elektroerozyjną drążarkę drutową (WEDM — *Wire Electrodischarging Machining*) ZAP-BP 95dn. Za jej pomocą nacięto cienkim mosiężnym drutem ($\varnothing \approx 0,25$ mm) na pobocznicach próbek w przybliżeniu w odległościach ~ 5 mm wąskie rowki o wymiarach: $\sim 0,35$ mm i głębokości $\sim 0,1$ mm. Ponadto dokonano pomiaru odległości między tak wykonanymi znacznikami projektorem pomiarowym Starrett VB400 (dokładność 0,001 mm).

Mając na uwadze wpływ początkowej porowatości próbek na mechaniczne parametry spieków miedzi, podzielono je na trzy grupy ze średnimi początkowymi porowatościami odpowiednio: $\Delta_{0p} = (1 - \rho_{0p} / \rho_l) \approx 7\%$, 12% i 17%, gdzie ρ_l oznacza gęstość litej miedzi.

Dla porównania parametrów w identyczny sposób (toczenie, znaczenie, pomiar) wykonano próbki z litej miedzi elektrolitycznej Cu-ETP w stanie wyżarzonym (500°C, 1 h) o takich samych wymiarach jak próbki spiekane.

W celu oszacowania jednorodności rozkładu gęstości spieku, ρ_s , wzdłuż osi próbki przed testem Taylora jedną z nich o porowatości $\Delta_{0p} \approx 17\%$ pocięto wzdłuż znaczników x_i na dwanaście segmentów (plasterków) i zmierzono metodą hydrostatyczną ich średnie gęstości, ρ_{si} . W tabeli 1 zamieszczono względne średnie gęstości poszczególnych segmentów, $\rho_{si}(x_i)/\rho_{0p}$, odniesione do średniej gęstości całej próbki, ρ_{0p} . Jak widać, bezwzględny błąd odchyłki względnej gęstości spieku wzdłuż współrzędnej Langrange'a x od średniej gęstości całej próbki, ρ_{0p} , nie przekracza 2,5%. Zatem można przyjąć, że przedstawiona technologia wytwarzania walcowych próbek spieków miedzi o umiarkowanej porowatości (do 20%) zapewnia dostateczną jednorodność gęstości wzdłuż ich długości.

TABELA 1

Dyskretny rozkład względnej gęstości próbki, $\rho_s(x_i)/\rho_{0p}$, z porowatością $\Delta_{0p} \approx 17\%$ wzdłuż jej osi przed testem Taylora; ρ_{0p} — średnia początkowa gęstość próbki zmierzona hydrostatycznie, x_i — dyskretne wartości współrzędnej Lagrange'a, x , z początkiem położonym w płaszczyźnie zderzenia

x_i [mm]	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5	57,5
$\rho_s(x_i)/\rho_{0p}$	0,996	0,977	0,999	0,994	0,990	1,006	0,989	0,989	0,978	0,992	0,984	1,006
$\left 1 - \frac{\rho_s(x_i)}{\rho_{0p}} \right $ [%]	0,4	2,3	0,1	0,6	1,0	0,6	1,1	1,1	2,2	0,8	1,6	0,6

3. Sformułowanie problemu. Założenia

Celem pracy jest przedstawienie eksperymentalnego modelu określania dyskretnego rozkładu nominalnego odkształcenia ściskania wzdłuż osi pręta wykonanego z porowatego, ciągliwego i ściśliwego materiału, odkształconego podczas testu Taylora. Podstawą modelu jest uderzeniowy test Taylora, według którego obciążano pręty wykonane zgodnie z technologią przedstawioną w poprzedniej części pracy. Z pomiarów długości zaznaczonych na pobocznicach prętów elementów: Δx_0 przed uderzeniem i Δx_s po uderzeniu, określa się, zgodnie z definicją, dyskretne wartości nominalnego odkształcenia ściskania, a mianowicie:

$$\varepsilon_r(x_i) = 1 - \frac{\Delta x_s(x_i)}{\Delta x_0}. \quad (3.1)$$

Średnie nominalne odkształcenie plastyczne próbki po teście Taylora określa się również z definicyjnego wzoru, tj.

$$\varepsilon_a = \frac{L - L_k}{L} = 1 - \frac{L_k}{L}, \quad (3.2)$$

gdzie L_k jest końcową długością próbki po teście Taylora.

Należy zauważyć, że związek (3.1) określa się za pomocą wyników uzyskanych z pojedynczej próbki obciążonej według testu Taylora z daną prędkością uderzenia. Jest to ewidentna zaleta omawianego eksperymentalnego modelu badań dynamicznych właściwości materiałów porowatych.

Prezentowany model bazuje na następujących założeniach:

- 1) Rozpatruje się prostopadłe uderzenie płasko zakończzonego cylindrycznego pręta (pocisku) w płaską, sztywną tarczę (płyte).

- 2) Pręt wykonany jest z ciągliwego, porowatego spieku o porowatości od niskiej do średniej wartości ($\Delta_{0p} < 20\%$).
- 3) Wymiar pora spieku jest dużo mniejszy od średnicy pocisku, dlatego materiał ten można traktować jak kontinuum.

















4. Analiza dynamicznego rozkładu dyskretnych wartości nominalnego odkształcenia ściskania w odkształconych prętach miedzianych po testach Taylora

W celu dokonania wymienionej wyżej analizy odkształcenia, przeprowadzono na prętach miedzianych z różną początkową porowatością i jednakowych nominalnych wymiarach początkowych ($L_0 = 60$ mm, $D_0 = 12$ mm) testy Taylora dla kilku wartości prędkości uderzenia. Pręty przygotowano według technologii przedstawionej w drugiej części pracy. Fotografie próbek odkształconych plastycznie podczas testów Taylora pokazane są na rysunku 1.

Dyskretne wartości wielkości $\Delta x_s(x_i)$ i $\varepsilon_r(x_i)$ dla ustalonych wartości współrzędnej Lagrange'a x_i w odkształconych podczas testów Taylora prętach z różnymi początkowymi porowatościami oraz przy kilku wartościach prędkości uderzenia zamieszczono w tabeli 2. Ponadto w celu porównania wyników badań przeprowadzono analogiczne testy na próbkach wykonanych z litej miedzi o porowatości równej zero. Przytoczone w tabeli wielkości prędkości uderzenia charakteryzują udarowe obciążenie danej próbki podczas testu. Prędkości te można aproksymować w przybliżeniu prędkościami średnimi: 100, 150 i 200 m/s.

Po interpolacji zamieszczonych w tabeli 2 wartości liczbowych $\varepsilon_r(x_i)$ otrzymuje się trzy zbiory krzywych charakteryzujących zmianę nominalnego odkształcenia ściskania $\varepsilon_r(x)$ w odkształconych prętach w funkcji współrzędnej Lagrange'a x skierowanej wzdłuż osi pręta z początkiem położonym w płaszczyźnie zderzenia (rys. 2).

Głównym parametrem, który wyróżnia przytoczone na rysunku 2 zbiory krzywych $\varepsilon_r(x)$, jest prędkość uderzenia U . Wraz ze wzrostem prędkości U proporcjonalnie rośnie odkształcenie $\varepsilon_r(x)$ w całym przedziale zmiennej Lagrange'a x , niezależnie od początkowych wartości porowatości Δ_{0p} próbki. Istotnym zjawiskiem jest fakt, że maksymalna wartość odkształcenia $\varepsilon_{r \max}$ występuje nie w przekroju kontaktu pręta z tarczą ($x = 0$), lecz w bliskim jego otoczeniu. Jest to wynik lokalnego redukowania przez siłę tarcia radialnego wypływu materiału pręta w sąsiedztwie tarczy podczas uderzenia. Powoduje to mniejszą redukcję grubości elementu pręta $\Delta x_s(0)$ bezpośrednio kontaktującego z tarczą w odniesieniu do pozostałych elementów, co skutkuje lokalnym zmniejszeniem osiowego odkształcenia, tj. $\varepsilon(0) = 1 - [\Delta x_s(0)/\Delta x_0]$. Publikowane dotychczas teoretyczne modele testu Taylora nie uwzględniają tego zjawiska. Określone przez nie maksymalne odkształcenie osiowe pręta zlokalizowane jest w przekroju kontaktującym bezpośrednio z tarczą [1-11] (rys. 3 [6]).

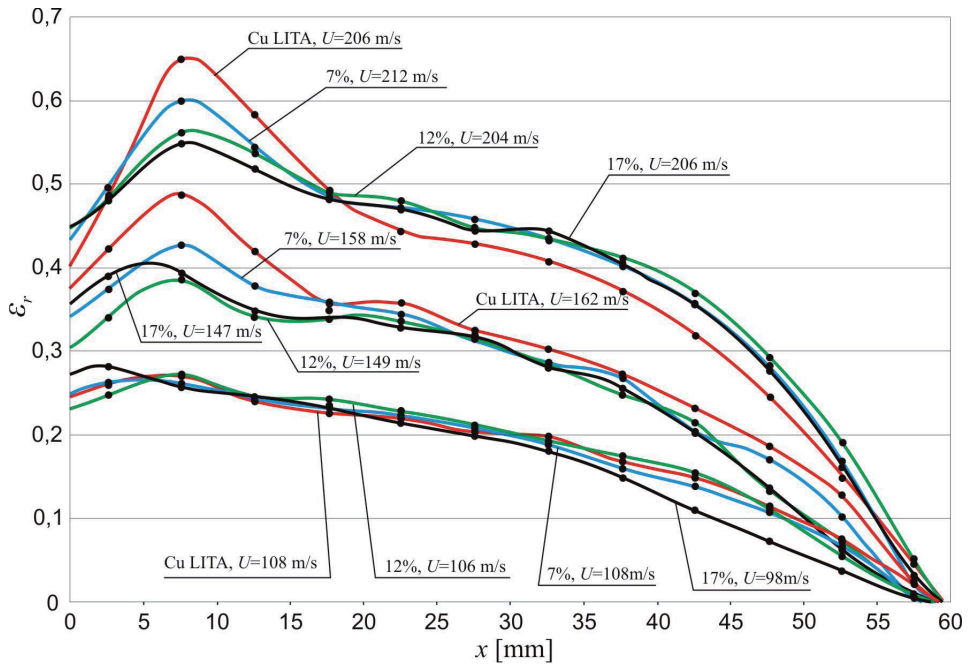
U [m/s]	0	108	162	206
Miedź LITA $\Delta_{0p} = 0\%$				
L_k [mm]	60	48,83	42,35	36,36
U [m/s]	0	108	158	212
Porowatość $\Delta_{0p} \approx 7\%$				
L_k [mm]	60	49,22	42,85	35,71
U [m/s]	0	106	149	204
Porowatość $\Delta_{0p} \approx 12\%$				
L_k [mm]	60	49,16	44,48	35,73
U [m/s]	0	98	147	206
Porowatość $\Delta_{0p} \approx 17\%$				
L_k [mm]	60	49,90	44,38	36,57

Rys. 1. Kształty cylindrycznych próbek odkształconych plastycznie podczas testów Taylora. Początkowe wymiary próbek jednakowe: długość $L_0 = 60$ mm, średnica $D_0 = 12$ mm

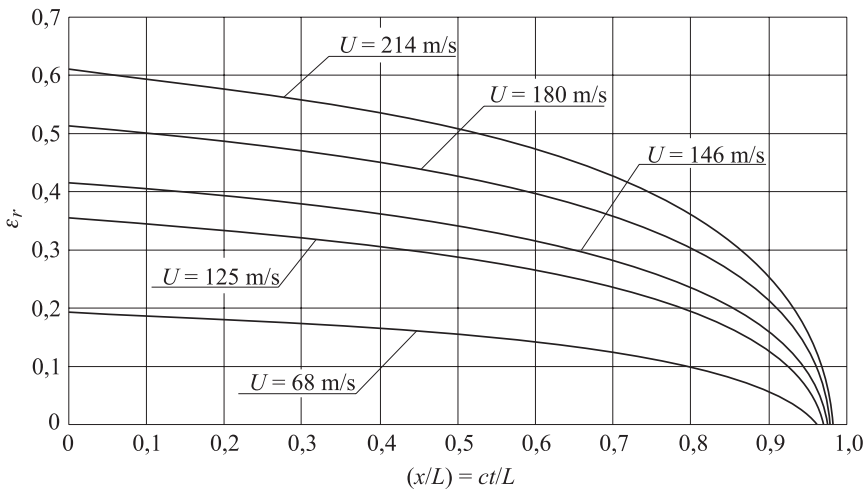
TABELA 2
 Dyskretny dynamiczny rozkład wielkości $\Delta x_s(x_i)$ i $\varepsilon_r(x_i)$ w funkcji współrzędnej Lagrange'a x_i w odkształconych plastycznie prętach miedzianych podczas testów Taylora

x_i [mm]	Cu LITA											
	$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 108$	2,5	7,5	12,5	17,5	22,5	27,5	32,5	37,5	42,5	47,5	52,5
$\varepsilon_r(x_i)$	3,78	3,64	3,81	3,86	3,89	3,98	4,01	4,15	4,25	4,42	4,55	4,64
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 162$	0,26	0,27	0,24	0,23	0,22	0,20	0,20	0,17	0,15	0,12	0,08	0,02
$\varepsilon_r(x_i)$	3,00	2,55	2,91	3,20	3,22	3,35	3,50	3,63	3,82	4,07	4,42	4,69
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 206$	0,42	0,49	0,42	0,36	0,36	0,33	0,30	0,27	0,23	0,19	0,13	0,02
$\varepsilon_r(x_i)$	2,68	1,76	2,11	2,53	2,78	2,85	2,95	3,12	3,42	3,76	4,16	4,41
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 108$	0,48	0,65	0,58	0,49	0,44	0,43	0,41	0,37	0,32	0,25	0,15	0,05
$\varepsilon_r(x_i)$	3,60	3,70	3,79	3,83	3,88	3,96	4,05	4,20	4,30	4,46	4,66	4,91
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 158$	0,26	0,26	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,16	0,14	0,11	0,07	0,01
$\varepsilon_r(x_i)$	3,08	2,87	3,11	3,21	3,28	3,44	3,56	3,65	3,97	4,13	4,48	4,80
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 212$	0,37	0,43	0,38	0,36	0,34	0,31	0,29	0,27	0,20	0,17	0,10	0,00
$\varepsilon_r(x_i)$	2,44	2,01	2,28	2,57	2,64	2,70	2,81	2,97	3,20	3,57	4,12	4,73
$\Delta x_s(x_i)$ [m/s] $U = 158$	0,49	0,60	0,54	0,48	0,47	0,46	0,44	0,40	0,36	0,29	0,17	0,02
$\varepsilon_r(x_i)$												

$$\Delta_{op} = (1 - \rho_0/\rho) \approx 7\%$$



Rys. 2. Interpolacyjne krzywe $\epsilon_r(x)$ charakteryzujące zmianę lokalnego nominalnego odkształcenia ściskania w funkcji współrzędnej Lagrange'a x w odkształconych plastycznie prętach podczas testów Taylora



Rys. 3. Teoretyczny rozkład lokalnego odkształcenia ϵ_r w pręcie z litej miedzi bez uwzględnienia wpływu siły tarcia po teście Taylora [6]

Ponadto ciekawym zjawiskiem występującym przy dużych prędkościach uderzenia (obciążeniach) pręta jest wyraźne zmniejszanie się maksymalnej wartości lokalnego odkształcenia, $\varepsilon_{r \max}$, wraz ze wzrostem początkowej porowatości próbki Δ_{0p} , odwrotnie niż w statyce. Prawdopodobną przyczyną tego faktu jest uderzeniowe grzanie zamkniętego w porach gazu, które skutecznie hamuje lokalny wzrost odkształcenia próbki. Natomiast jeśli próbka jest zgniatana quasi-statycznie, wówczas zamknięty w porach gaz jest sprężany izotermicznie i odkształcenie rośnie wraz ze wzrostem początkowej porowatości próbki Δ_{0p} .

Przy małych prędkościach uderzenia (obciążeniach) wpływ niskiej ($\Delta_{0p} < 7\%$) i średniej ($\Delta_{0p} < 30\%$) początkowej porowatości na wartości osiowego odkształcenia, ε_r , jest niewielki i w inżynierskich obliczeniach można go nie uwzględniać. W przecie podczas uderzenia naprężenie maleje w miarę oddalania się od tarczy, dlatego przy prędkościach uderzenia $U > 100$ m/s dla $x > 20$ mm, a dla $U < 100$ m/s w całym zakresie $x > 0$ zbiory krzywych można aproksymować krzywymi otrzymanymi dla litej miedzi.

Podobnie średnie odkształcenie, ε_{sr} , limitowane jest przez prędkość uderzenia i w zakresie umiarkowanej porowatości ($\Delta_{0p} < 20\%$) praktycznie od niej nie zależy (tab. 3).

TABELA 3

Średnie wartości nominalnego odkształcenia ściskania próbek miedzi po testach Taylora

Miedź LITA			$\Delta_{0p} \approx 7\%$			$\Delta_{0p} \approx 12\%$			$\Delta_{0p} \approx 17\%$		
U [m/s]	L_k [mm]	ε_{sr}	U [m/s]	L_k [mm]	ε_{sr}	U [m/s]	L_k [mm]	ε_{sr}	U [m/s]	L_k [mm]	ε_{sr}
108	48,83	0,186	108	49,22	0,180	106	49,16	0,181	98	49,90	0,168
162	42,35	0,294	158	42,85	0,286	149	44,48	0,259	147	44,38	0,260
206	36,36	0,394	212	35,71	0,405	204	35,73	0,405	206	36,57	0,391

5. Uwagi końcowe

1. Na bazie uderzeniowego testu Taylora opracowano prosty eksperymentalny model określania dyskretnego, nominalnego odkształcenia ściskania w porowatym przecie ciągłym po udarowym odkształceniu plastycznym. Rozkład lokalnego odkształcenia wzdłuż osi pręta w funkcji współrzędnej Lagrange'a x określa wzór (3.1). Zaletą modelu jest fakt, że dane do realizacji związku (3.1) uzyskuje się z pojedynczej próbki obciążonej według testu Taylora.
2. Za pomocą tego modelu wykryto, że odkształcenie lokalne $\varepsilon_r(x)$ osiąga maksymalną wartość w otoczeniu uderzającego końca pręta (rys. 2), a nie w płaszczyźnie

- zderzenia, jak podaje się w literaturze, w której nie uwzględnia się redukcyjnego wpływu siły tarcia na radialny wypływ materiału pręta w sąsiedztwie tarczy.
3. Ponadto stwierdzono, że maksymalna wartość odkształcenia $\varepsilon_{r\max}$ przy dużych obciążeniach dynamicznych maleje wraz ze wzrostem porowatości materiału pręta — odwrotnie niż w statyce. Prawdopodobną przyczyną tej anomalii jest grzanie uderzeniowo komprymowanego w zamkniętych porach gazu, które skutecznie hamuje odkształcalność próbki.
 4. Parametrem limitującym wielkość bieżącego, $\varepsilon_r(x)$, i średniego, ε_{sr} , odkształcenia w porowatym pręcie po teście Taylora jest prędkość uderzenia U . Natomiast wpływ umiarkowanej porowatości (dla Cu $\Delta_{0p} < 20\%$) jest niewielki i można go przy małych i średnich prędkościach uderzenia ($U < 150$ m/s) pominąć. Na przykład dla spieków miedzi przy prędkościach uderzenia $U < 150$ m/s w obliczeniach inżynierskich można wykorzystać wyniki uzyskane dla próbek wykonanych z litej miedzi.

Podziękowania

Wyrażamy serdeczne podziękowania Kolegom: dr. hab. inż. Jackowi Janiszewskiemu i dr. hab. inż. Michałowi Grązce za nieocenioną pomoc w pracach eksperymentalnych i udział w merytorycznych dyskusjach dotyczących badanego zagadnienia.

LITERATURA

- [1] G.I. TAYLOR, *The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress, I. Theoretical considerations*, Proc. Roy. Soc., Series a, London, 1948, 194, 289-99.
- [2] A.C. WHIFFIN, *The use of flat-ended projectiles for determining dynamic yield stress, II. Tests on various metallic materials*, Proc. Roy. Soc., Series a, London, 1948, 194, 300-22.
- [3] J.B. HAWKYARD, D. EATON, W. JOHNSON, *The mean dynamic yield strength of cooper and low carbon steel at elevated temperatures from measurements of the mushrooming of flat-ended projectiles*, Int. J. Mech. Sci., 1968, 10, 929-48.
- [4] J.B. HAWKYARD, *A theory for the mushrooming of flat-ended projectiles impinging on a flat rigid anvil, using energy consideration*, Int. J. Mech. Sci., 1969, 11, 313-33.
- [5] E. WŁODARCZYK, M. SARZYŃSKI, *Dynamiczne zachowanie się metalowego pręta ze wzmocnieniem potęgowym uderzającego w sztywną tarczę. I: rozważania teoretyczne*, Biul. WAT, 62, 1, 2013.
- [6] E. WŁODARCZYK, M. SARZYŃSKI, *Dynamiczne zachowanie się metalowego pręta ze wzmocnieniem potęgowym uderzającego w sztywną tarczę. II: analiza mechanicznych charakterystyk wyżarzzonego pręta miedzianego Cu-ETP*, Biul. WAT, 62, 1, 2013.
- [7] E. WŁODARCZYK, M. SARZYŃSKI, *Analysis of dynamic parameters in a metal cylindrical rod striking a rigid target*, Journal of Theoretical and Applied Mechanics (JTAM), 51, 4, 2013.
- [8] E.H. LEE, S.J. TUPPER, *Analysis of plastic deformation in a steel cylinder striking a rigid target*, J. Appl. Mech. Trans., ASME, 21, 1954, 63-70.
- [9] G. LU, B. WANG, T. ZHANG, *Taylor impact test for ductile porous materials, Part 1: Theory*, Int. J. Impact. Eng., 25, 2001, 981-991.
- [10] B. WANG, T. ZHANG, G. LU, *Taylor impact test for ductile porous materials, Part 2: experiments*, Int. J. Impact Eng., 28, 2003, 499-511.

- [11] E. ZHANG, B. WANG, *On the compressive behavior of sintered porous coopers with low to medium porosities*, Part 1: *Experimental study*, Int. J. of Mechanical Sciences 47, 2005, 744-756.

E. WŁODARCZYK, M. SARZYŃSKI

**On singularities of a compressive nominal strain in a ductile porous rod
after Taylor's test**

Abstract. A simple experimental model for determination of the running and average nominal compressive strain, $\varepsilon_r(x)$ and ε_a in the ductile porous rod, plastically deformed during Taylor test, has been presented in this paper. It is revealed that in the axial distribution of the strain $\varepsilon_r(x)$ (x — Lagrangian coordinate) there are two singularities:

1. The maximum running strain, $\varepsilon_{r\max}$ there is near of the striking end of the rod, but it does not locate on the impact plane, as it is presented in available literature so far.
2. At high loading (impact velocity), value of the maximum, $\varepsilon_{r\max}$, decreases as the initial porosity of the rod increases. A physical reason of these interesting phenomena is presented in Section 4 of this paper. In turn, the average strain, ε_a , from low to medium porosity, practically does not depend on its value and it is determined by impact velocity. Bearing in mind the above facts, one can think that this paper has applicable and cognitive importance.

Keywords: porous metals, dynamic compressive, Taylor direct impact experiment