

dr inż. Leopold KRUSZKA*
ppłk dr inż. Mariusz MAGIER**
* Wojskowa Akademia Techniczna
** Wojskowy Instytut Techniczny Uzbrojenia

DOŚWIADCZALNE BADANIA LEPKOPLASTYCZNYCH WŁASNOŚCI MATERIAŁU PENETRATORA WYKONANEGO ZE SPIEKU NA OSNOWIE WOLFRAMOWEJ

Streszczenie. W pracy przedstawiono wyniki badań granicy plastyczności spieku na osnowie wolframowej wykorzystywanego w produkcji penetratorów czołgowych pocisków podkalibrowych. Badania dynamiczne w zakresie dużych szybkości odkształcenia do $6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$ zrealizowano metodą zmodyfikowanego (dzielonego) pręta Hopkinsona. Na podstawie otrzymanych eksperymentalnych wyników badań dynamicznych stwierdzono, że w obliczeniach inżynierskich można stosować model biliniowy spężysto-idealnie lepkoplastyczny.

EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS OF VISCO-PLASTIC PROPERTIES OF TUNGSTEN ALLOY

Abstract. The results of strength investigations of the tungsten alloy are discussed in this paper. Dynamic tests have been realized using the split Hopkinson pressure bars techniques at strain rate up to $6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$.

1. Wprowadzenie

W przypadku aplikacji militarnych związanych z fizyką wybuchu i balistyką końcową, celem prowadzenia badań własności mechanicznych materiału konstrukcyjnego pocisku (w tym przypadku penetratora podkalibrowego pocisku kinetycznego) jest przede wszystkim określenie zmian własności mechanicznych (wytrzymałość, plastyczność) w funkcji szybkości odkształceń, stanowiących podstawę dalszych analiz i optymalizacji konstrukcji pocisku w celu osiągnięcia pożądanej głębokości przebiccia. Pomiar własności mechanicznych penetratorów pocisków kinetycznych przeprowadza się poprzez badania próbek materiałów w testach rozciągania, ściskania lub skręcania. W badaniach z użyciem standardowych maszyn wytrzymałościowych wyznacza się parametry wytrzymałościowe materiału dla prędkości odkształceń do 5 s^{-1} . Przy zastosowaniu urządzeń wytrzymałościowych o specjalnej konstrukcji można wyznaczyć parametry wytrzymałościowe materiału dla prędkości odkształceń około 200 s^{-1} . Podstawową metodą pozwalającą określić doświadczalnie lepkoplastyczne właściwości materiałów konstrukcyjnych w zakresie szybkości odkształcenia $500 \text{ s}^{-1} \div 10^4 \text{ s}^{-1}$ jest zaproponowana przez Kolskiego w pracy [1] metoda pręta Hopkinsona. Zmodyfikowaną wersję zastosowanej przez Kolskiego techniki zaproponował Lindholm w pracy [2] i wersja ta zwana jako dzielony pręt Hopkinsona (*split Hopkinson pressure bar* - dwa pręty pomiarowe: inicjujący i transmitujący, między którymi znajduje się badana próbka materiału), jest stosowana dotychczas. Metodę badania z użyciem pręta Hopkinsona można stosować zarówno w badaniach na ściskanie, jak też na rozciąganie, skręcanie i ścinanie [3].

W celu uzyskania szybkości deformacji wyższych od 10^4 s^{-1} Dharan i Hauser w pracy [4] zaproponowali modyfikację układu pręta Hopkinsona polegającą na usunięciu pierwszego pręta pomiarowego (inicjującego), umieszczonego przed próbką i bezpośrednim uderzeniu pocisku (pręta obciążającego) w próbkę opartą o pręt transmitujący. Modyfikacja ta jest określana jako bezpośrednie uderzenie (*direct impact*).

W niniejszej pracy zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych spieków na osnowie wolframowej w szerokim zakresie szybkości odkształcenia, ze szczególnym zwróceniem uwagi na odcinek plastyczny krzywej $\sigma(\epsilon)$. Na podstawie uzyskanych na drodze eksperymentalnej zależności „naprężenie - odkształcenie - szybkość odkształcenia” dla badanych materiałów, można przewidzieć ich właściwości użytkowe w zastosowaniu do budowy wydłużonych pocisków podkalibrowych.

2. Metodyka badań

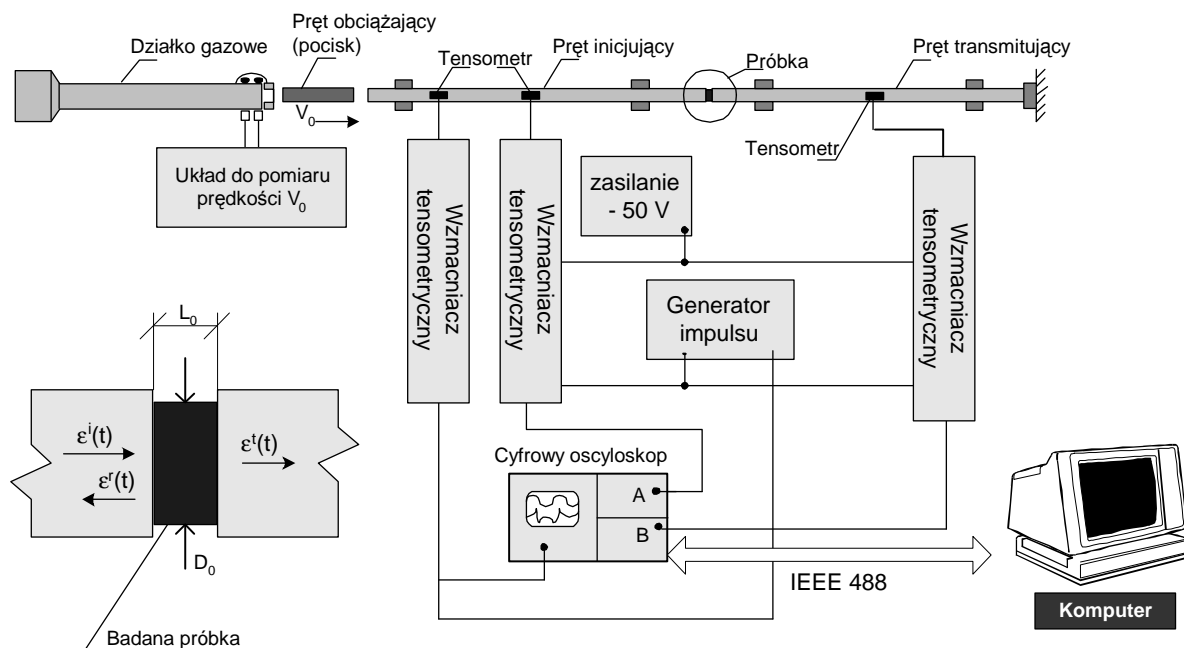
W niniejszej pracy badaniom wytrzymałościowym w dynamicznej próbie na ściskanie poddano próbki walcowe o średnicy $D_o \approx 6 \text{ mm}$ i długości $L_o \approx 3 \text{ mm}$ o parametrach przedstawionych w tabeli 1 niniejszego rozdziału.

Skład chemiczny tego materiału oraz jego statyczne właściwości mechaniczne (zgodnie z kartą producenta) w temperaturze pokojowej: R_{02} - granicę plastyczności przy umownym odkształceniu trwałym 0,2 %, R_m - wytrzymałość na rozciąganie, A_5 – względne wydłużenie po rozerwaniu, HRC – twardość, podano w tabeli 1. Gęstość ρ_o tego stopu wynosi $17,3 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 1. Skład chemiczny i własności mechaniczne badanego spieku na osnowie wolframowej

Składniki stopowe, %	W	Fe	Ni	Co
		91,25	8,75	
Właściwości mechaniczne	R_{02} [MPa]	R_m [MPa]	A_5 [%]	Twardość
	Min. 1200	Min. 1300	Min. 8	Min. 38 <i>HRC</i>

W celu uzyskania informacji o właściwościach mechanicznych badanego spieku odkształcanego dynamicznie z dużą szybkością odkształcenia rzędu 10^3 s^{-1} przeprowadzono próby dynamicznego ściskania próbek walcowych na stanowisku badawczym zwanym zmodyfikowanym (dzielonym) prętem Hopkinsona (SHPB). Schemat blokowy eksperymentalnego stanowiska do prób na ściskanie przedstawiono na rysunku 1. Walcowa próbka umieszczona była między sprężystymi prętami pomiarowymi: inicjującym (przekazującym) i transmitującym (odbierającym) o średnicy 10 mm. Elektroniczny układ pomiarowy stanowią tensometry naklejone na prętach pomiarowych ze wzmacniaczami, oscyloskop cyfrowy i komputer wraz z oprogramowaniem sprzężony za pomocą złącza równoległego IEEE 488. Szczegółowy opis analizy eksperymentalnej przeprowadzanej z wykorzystaniem dzielonego pręta Hopkinsona do prób na ściskanie podano w [5].



Rys. 1 Schemat układu badawczego zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB)

2. Przebieg badań

Próbki walcowe badanego materiału poddano jednoosiowemu ścisnaniu w temperaturach 20°C, 150°C i 300°C w warunkach obciążenia dynamicznego. Badania dynamiczne w zakresie szybkości odkształcenia $\sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ \div $\sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ wykonano metodą zmodyfikowanego (dzielonego) pręta Hopkinsona. Na podstawie otrzymanych wyników eksperymentów przeprowadzono modelowanie zachowania się badanego materiału z uwzględnieniem efektów lepkoplastycznych. Wyniki przedstawiono w dwóch grupach próbek zestawionych w tabelach 2 i 3.

Tabela 2 Zestawienie wyników pomiarów dla próby ściskania z zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB)-pierwsza grupa próbek

Numer próbki	Pręt obciążający (pocisk)				Próbka							Uwagi
	Długość, mm	Materiał	Ciśnienie, kG/cm ²	Prędkość, m/s	Średnica D, (mm)	Wysokość h, mm	S, mm ²	Szybkość odkształceń, 1/s	Wysokość próbki po odkształceniu, mm	Odształcenie plastyczne, %	Temperatura, C	
c520_01	300	stal	1	8,25	5,97	2,97	27,99		2,93	1,36	20	Deformacja sprężysta
c520_01_2	300	stal	3	15,06	6,02	2,93	28,46	1830	2,375	21,00	20	Deformacja sprężysta
c520_02	300	stal	2	12,44	5,975	2,96	28,04	1000	2,66	10,69	20	
c520_03	300	stal	7	23,58	5,97	2,96	27,99	4560	1,625	59,97	20	
c520_04	300	stal	2	12,50	5,97	2,96	27,99	1000	2,64	11,44	20	
c520_05	300	stal	7	24,04	5,97	2,96	27,99	4560	1,585	62,46	20	
c520_06	300	stal	3	15,43	5,97	2,95	27,99	2032	2,37	21,89	20	
c520_07	300	stal	2	12,63	5,97	2,95	27,99	1600	2,485	17,15	150	
c520_08	300	stal	2	Brak pomiaru	5,97	2,945	27,99	Brak pomiaru	2,46	17,99	150	Brak pomiaru
c520_09	300	stal	2	12,63	5,97	2,95	27,99	1750	2,58	13,40	150	
c520_10	300	stal	5	20,00	5,97	2,95	27,99	3750	1,8	49,40	150	
c520_11	300	stal	5	19,84	5,97	2,95	27,99	3780	1,82	48,30	150	
c520_12	300	stal	2	12,69	5,97	2,95	27,99	1776	2,375	21,68	300	
c520_13	300	stal	2	12,69	5,97	2,95	27,99	1940	2,37	21,89	300	
c520_14	300	stal	5	19,69	5,97	2,95	27,99	4180	1,65	58,10	300	
c520_15	300	stal	5	19,84	5,97	2,95	27,99	4170	1,64	58,71	300	
c520_16	300	stal	7	23,36	5,97	2,95	27,99	4280	1,55	64,36	20	

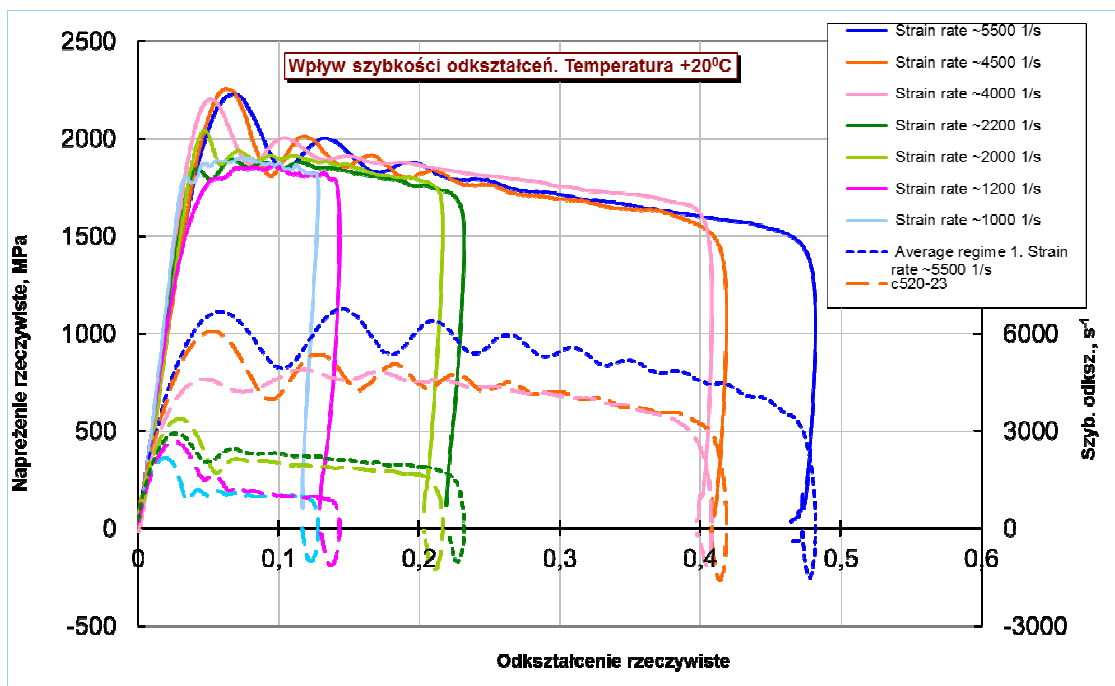
Tabela 3 Zestawienie wyników pomiarów dla próby ściskania z zastosowaniem dzielonego pręta Hopkinsona (SHPB)-druga grupa próbek

Numer próbki	Pręt obciążający (pocisk)				Próbka							Uwagi
	Długość, mm	Materiał	Ciśnienie, kG/cm ²	Prędkość, m/s	Średnica D, (mm)	Wysokość h, mm	S, mm ²	Szybkość odkształceń, 1/s	Wysokość próbki po odkształceniu, mm	Odkształcenie plastyczne, %	Temperatura, C	
c520_17	300	steel	9	26,32	5,97	3	27,99	5000	1,33	81,34	20	
c520_18	300	steel	9	25,77	5,965	2,99	27,95	5000	1,24	88,02	20	
c520_19	300	steel	9	26,88	5,97	2,97	27,99	5000	1,23	88,15	20	
c520_20	300	steel	3	15,72	5,97	2,97	27,99	2000	2,33	24,27	20	
c520_21	300	steel	3	15,82	5,97	2,95	27,99	2000	2,355	22,53	20	
c520_22	300	steel	2	12,38	5,97	2,97	27,99	1000	2,63	12,16	20	
c520_23	300	steel	7	23,36	5,975	2,97	28,04	4000	1,55	65,03	20	
c520_24	300	steel	1,4	10,08	5,97	2,94	27,99	1000	2,7	8,52	150	
c520_25	300	steel	1,4	10,04	5,98	3,16	28,09	1000	2,89	8,93	150	
c520_26	300	steel	9	26,04	5,975	3,01	28,04	5000	1,24	88,68	150	
c520_27	300	steel	9	26,32	5,97	2,96	27,99	5000			150	Zły pomiar
c520_28	300	steel	1,4	9,80	5,975	2,94	28,04	1000	2,63	11,14	300	
c520_29	300	steel	1,4	10,68	5,975	2,97	28,04	1000	2,66	11,02	300	Zły pomiar
c520_30	300	steel	9	25,77	5,97	2,94	27,99	5000	1,23	87,14	300	
c520_31	300	steel	9	26,88	5,975	2,97	28,04	5000	1,21	89,79	300	Brak rejestracji wyników z pierwszego pręta pomiarowego
c520_32	300	steel	1,4	10,55	5,97	2,97	27,99	1000	2,65	11,40	300	

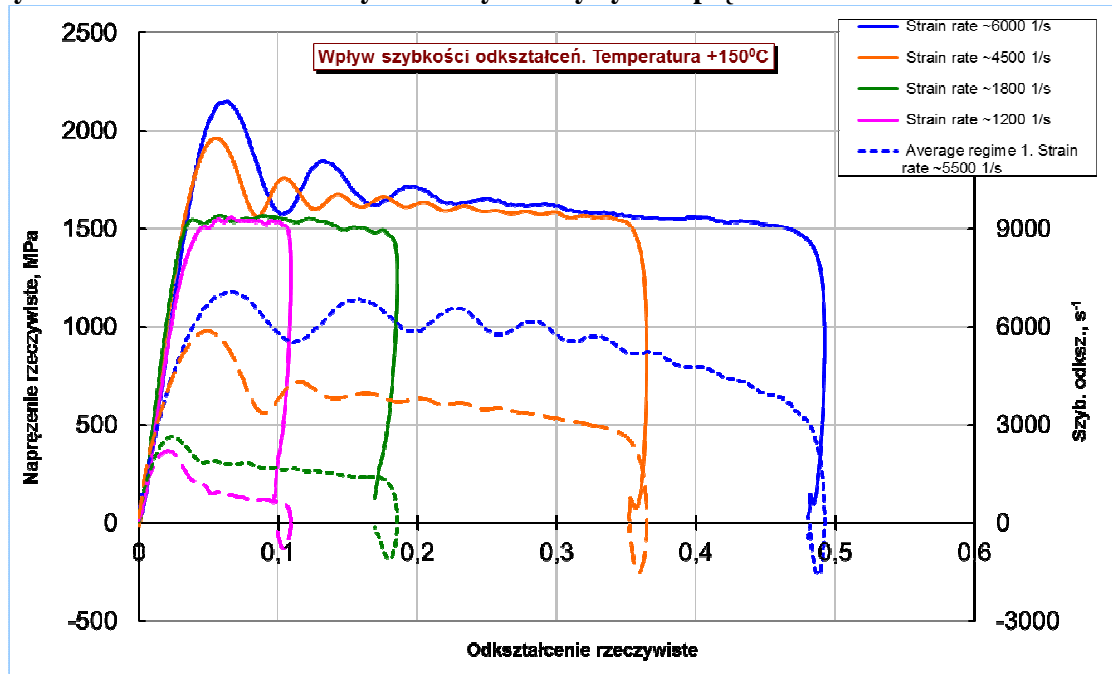
3. Analiza parametrów dynamicznych spieku na osnowie wolframowej dla dużych szybkości odkształceń

W niniejszym punkcie zaprezentowano graficzne zestawienia wyników przedmiotowych badań z uwzględnieniem wpływu szybkości odkształceń oraz temperatury próbek na charakter krzywej rzeczywistej naprężenie-odkształcenie.

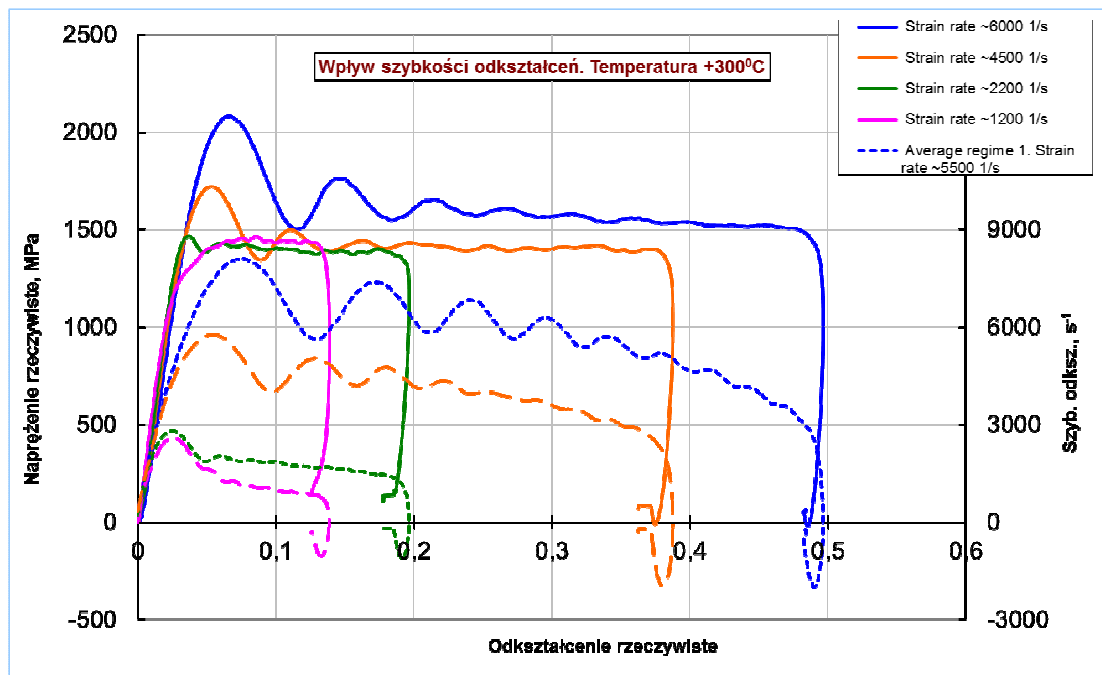
Wyniki zaprezentowano na rys. 2-8.



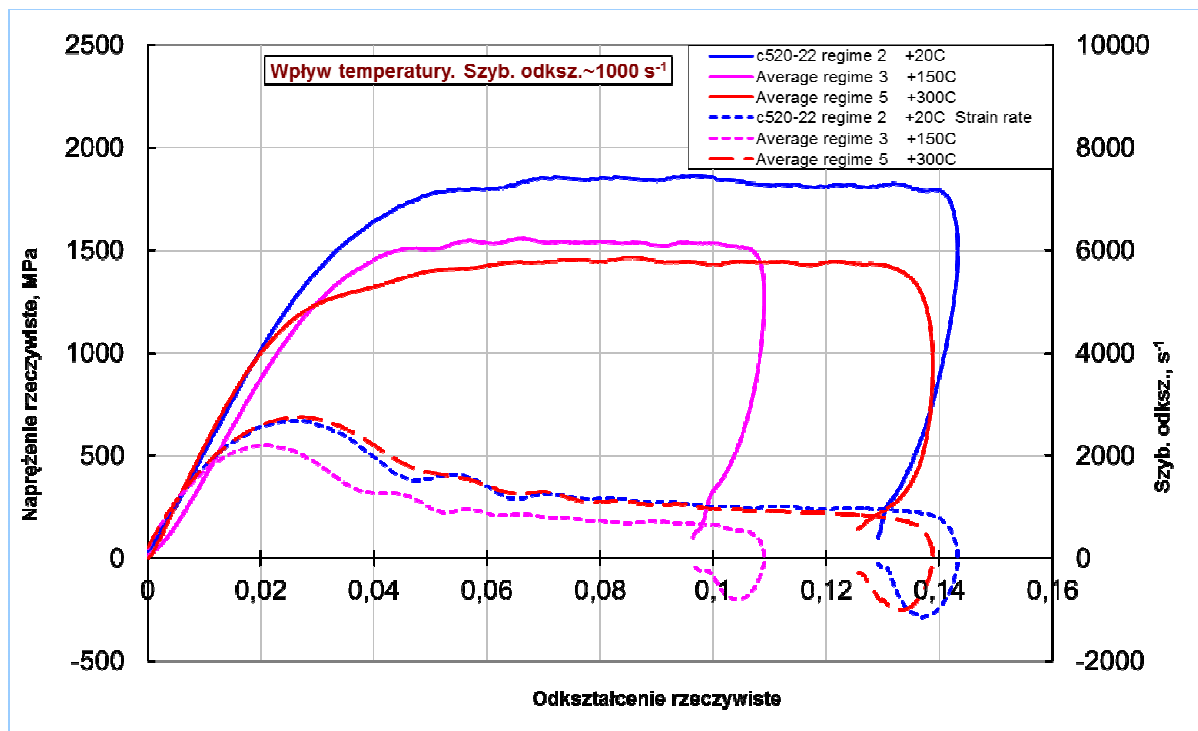
Rys. 2 Zbiornicze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla T=20°C.



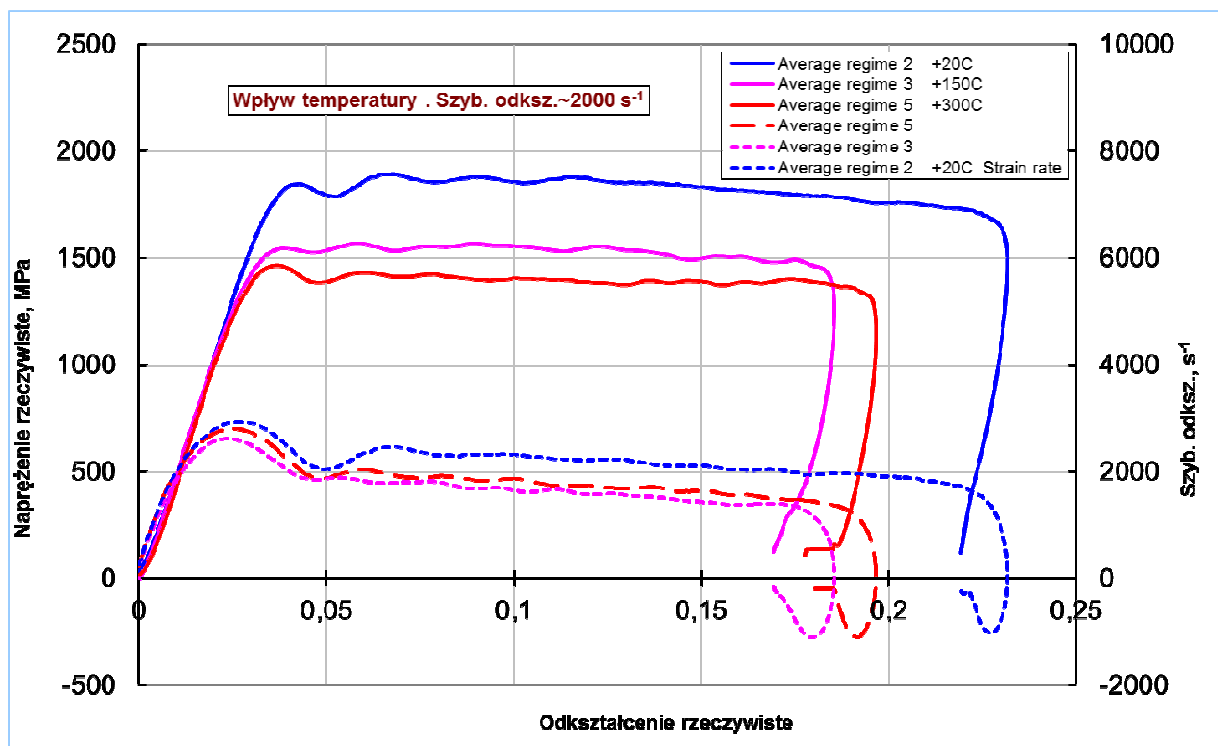
Rys. 3 Zbiornicze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla T=150°C.



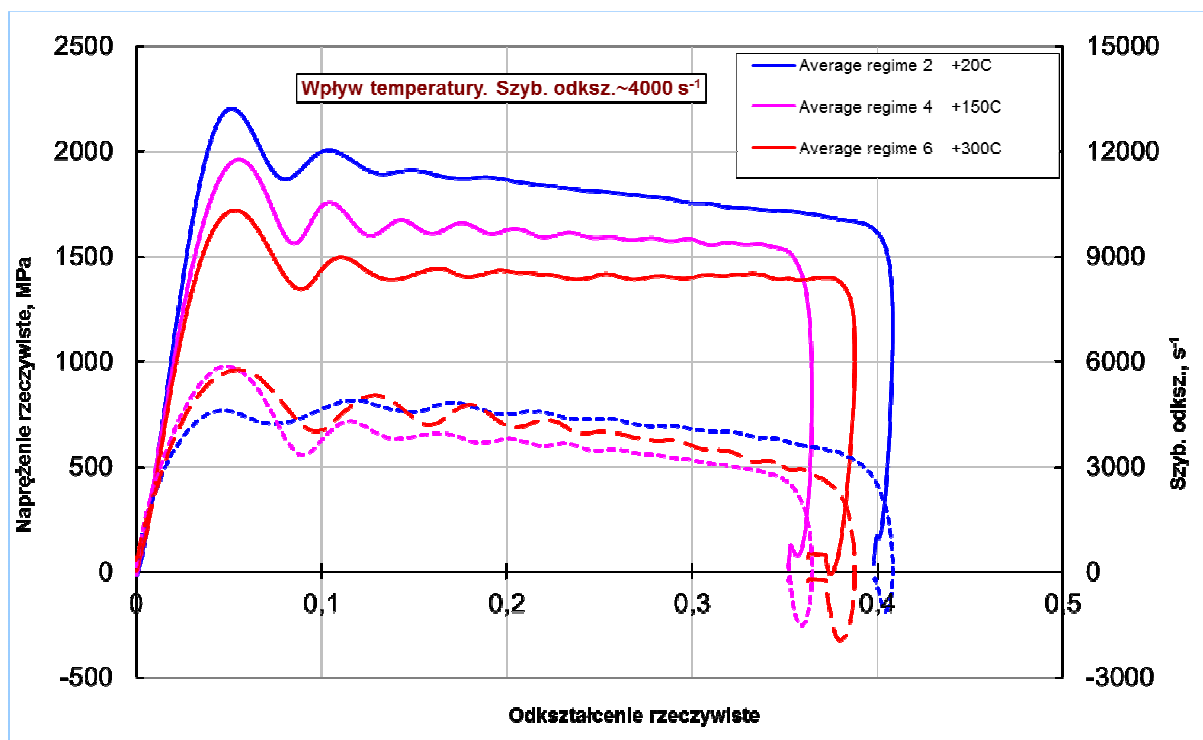
Rys. 4 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla $T=300^{\circ}\text{C}$.



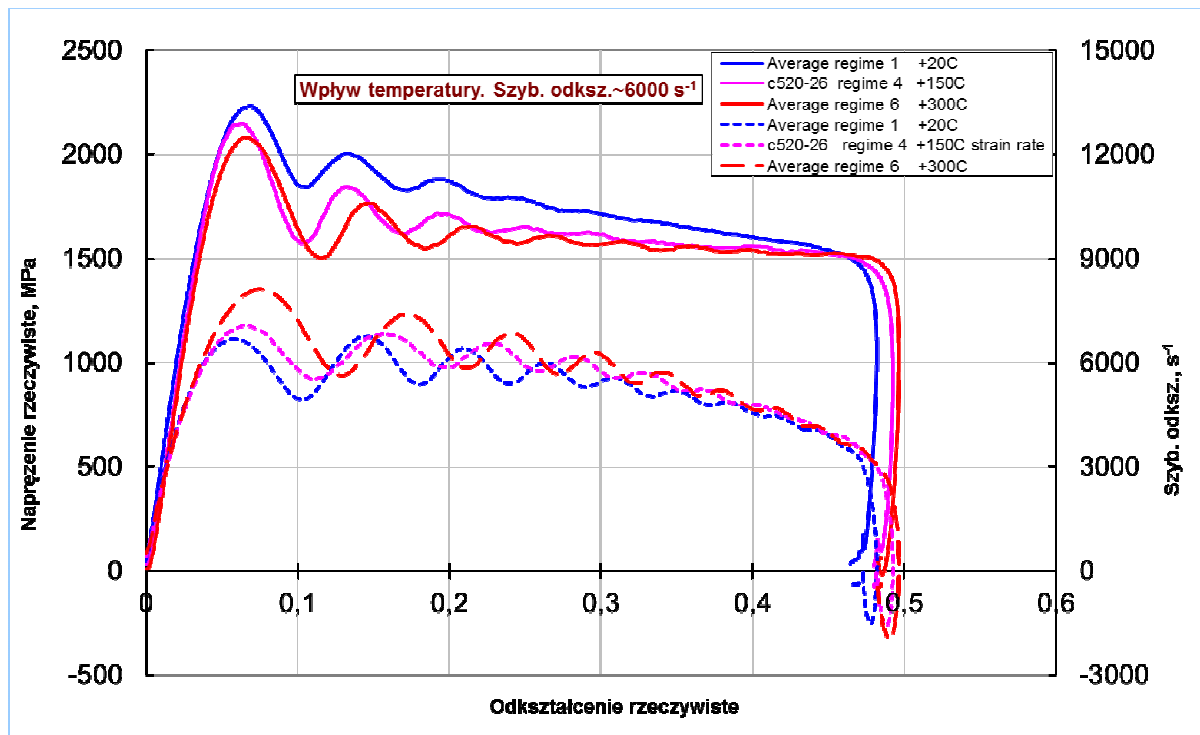
Rys. 5 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla $\dot{\epsilon} \sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 6 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla $\dot{\epsilon} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



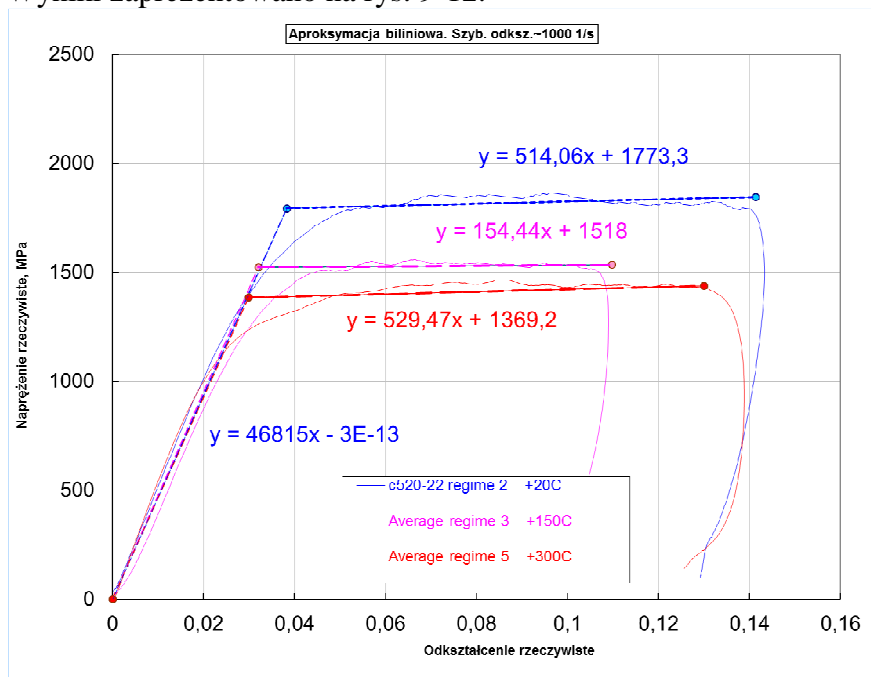
Rys. 7 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie dla $\dot{\epsilon} \sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



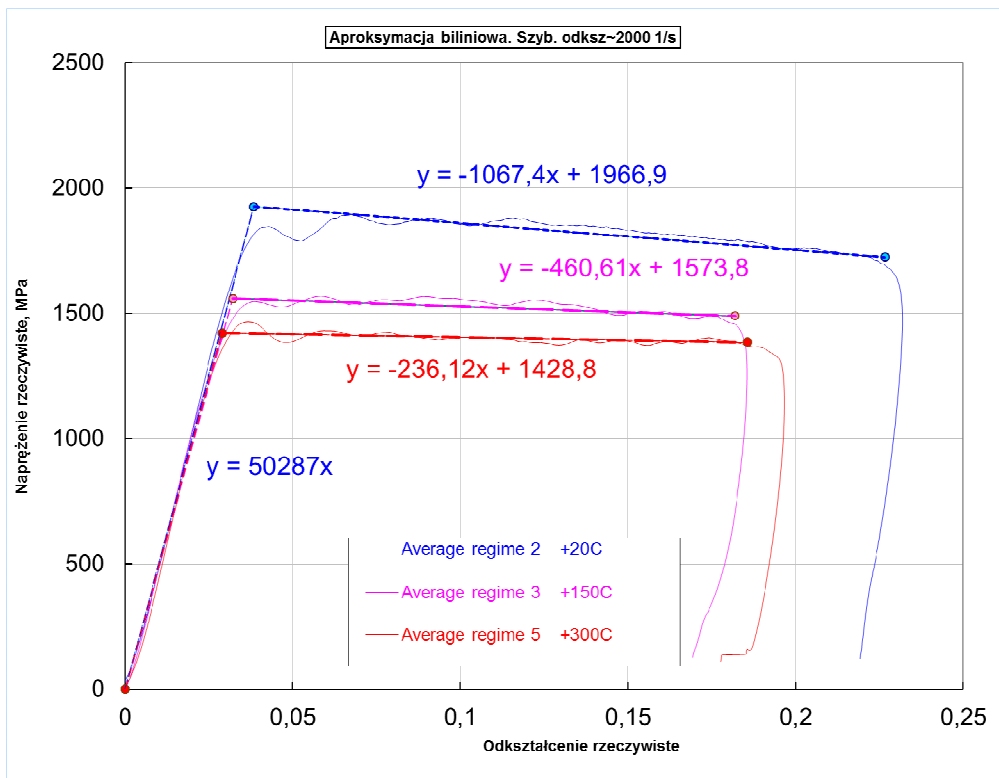
Rys. 8 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie dla $\dot{\epsilon} \sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$

4. Biliniowa aproksymacja krzywych napężenie-odkształcenie

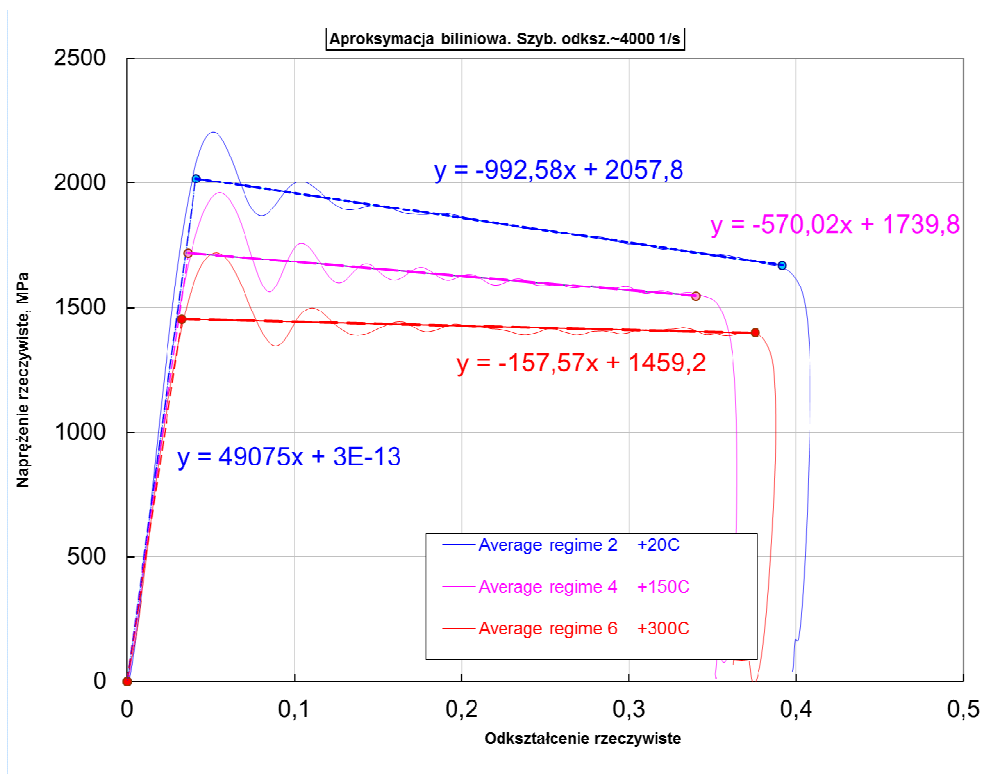
W niniejszym punkcie dokonano biliniowej aproksymacji krzywych napężenie-odkształcenie w zależności od szybkości odkształceń próbek badanego spieku, celem wyznaczenia ekstrapolowanych wartości granicy plastyczności w funkcji szybkości odkształceń. Wyniki zaprezentowano na rys. 9-12.



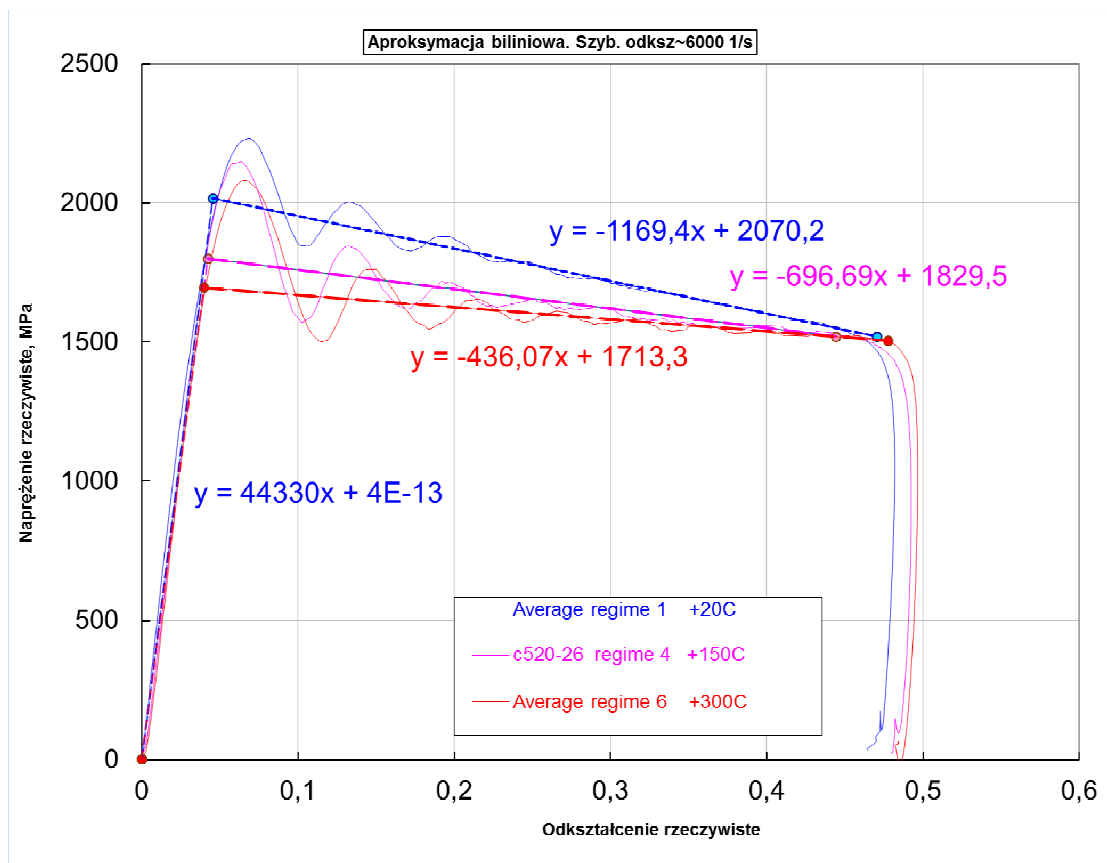
Rys. 9 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 1 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 10 Zbiorne zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



Rys. 11 Zbiorne zestawienie dynamicznych krzywych napężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.



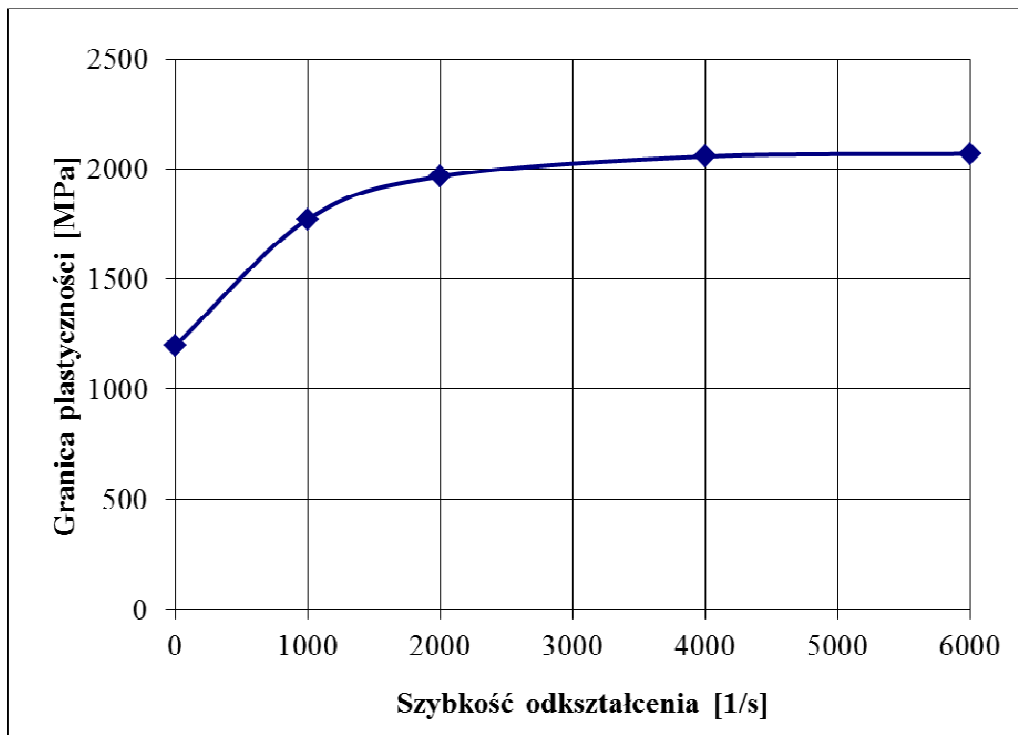
Rys. 12 Zbiorcze zestawienie dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie z naniesionymi krzywymi aproksymacji biliniowej dla $\dot{\epsilon} \sim 6 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Zachowanie badanego stopu na osnowie wolframowej można opisać biliniowym modelem sprężysto - idealnie lepkoplastycznym ciała izotropowego z ekstrapolowanymi granicami plastyczności R_e równymi: $R_{ed1} = 1773 \text{ MPa}$ dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń do $1 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, $R_{ed2} = 1967 \text{ MPa}$ dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $2 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, $R_{ed3} = 2058 \text{ MPa}$ dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $4 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$, oraz $R_{ed4} = 2070 \text{ MPa}$ dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $6 \cdot 10^3 \text{ s}^{-1}$.

5. Podsumowanie

Zaprezentowane wstępne wyniki dynamicznych eksperymentów fizycznych pozwoliły na pozyskanie jakościowych informacji dotyczących statycznych i dynamicznych krzywych naprężenie-odkształcenie badanego spieku na osnowie wolframowej.

Stwierdzono, że zwiększenie szybkości odkształcenia podwyższa właściwości wytrzymałościowe badanego spieku. Na podstawie wyników zestawionych w tabelach 2 i 3 (badania prętem Hopkinsona) oraz wyników badań quasi-statycznych zaprezentowanych w pracy [6] wykonano wykres (rys.13), przedstawiający doświadczalne ekstrapolowane wartości granicy plastyczności badanego materiału w funkcji szybkości odkształceń dla $T=20^\circ\text{C}$.



Rys. 13 Wpływ szybkości odkształceń na wartość granicy plastyczności badanego spieku.

Przeprowadzone eksperymenty fizyczne wykazały również znaczny wpływ osłabienia termicznego nagrzewanych do temperatur 150°C i 300°C próbek na charakter przebiegu wykresów naprężenie-odkształcenie.

Dla obciążeń dynamicznych badanego w temperaturze 150°C spieku w zakresie szybkości odkształceń $\sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ umowna granica plastyczności wynosi około $R_{02d1}=1450$ MPa, a dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ umowna granica plastyczności wynosi około $R_{02d2}=1750$ MPa.

Dla obciążeń dynamicznych badanego w temperaturze 300°C spieku w zakresie szybkości odkształceń $\sim 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ umowna granica plastyczności wynosi około $R_{02d1}=1400$ MPa, a dla obciążeń dynamicznych w zakresie szybkości odkształceń $\sim 4 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ umowna granica plastyczności wynosi około $R_{02d2}=1600$ MPa.

Literatura

1. Kolsky T. E., An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading, Proc. Phys. Soc., B62, 1949, s. 676.
2. Lindholm U. S., Some experiments with the split Hopkinson pressure bar, J. Mech. Phys. Sol., 12, 1964, s. 317.
3. Bragov A. M., Demenko P. V., Lomunov A. K., Sergeichev I. V., Kruszka L., Investigation of behavior of the materials of different physical nature using the Kolsky method and its modifications, (Chapter 9.1), in: New Experimental Methods in Material Dynamics and Impact, W. K. Nowacki and J. R. Klepaczko Eds., Series: Trends in Mechanics of Materials. Volume 3, Centre of Excellence for Advanced Materials and Structures, Polish Academy of Sciences, Warsaw, 2001, s. 337.
4. Dharan C. K. M., Hauser F. E., Determination of stress-strain characteristics at very high strain rates, Exp. Mech., 10, 1970, s. 370.

5. Kruszka L., Nowacki W. K., New applications of the Hopkinson pressure bar technique to determining dynamic behaviour of materials, J. Theor. Appl. Mech., 2, 34, 1996, s. 259.
6. Magier M., Panowicz R., Sacha M.: Badania Określenie quasi-statycznej granicy plastyczności materiału penetratora wykonanego ze spieku na osnowie wolframowej, Biuletyn PTU WITU nr 1/2011, zeszyt 117, s.163-168, Zielonka, 2011.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2009-2011 jako projekt badawczy własny nr O N501 052937.