

Analiza właściwości mechanicznych wybranych materiałów stosowanych w modułowych osłonach balistycznych

Wojciech Moćko^{1,2}, Zbigniew L. Kowalewski^{1,2}, Andrzej Wojciechowski¹, Dariusz Rudnik¹

¹Centrum Badań Materiałowych i Mechatroniki, Instytut Transportu Samochodowego

²Zakład Wytrzymałości Materiałów, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

email: wojciech.moćko@its.waw.pl, zkowalew@ippt.gov.pl, andrzej.wojciechowski@its.waw.pl, dariusz.rudnik@its.waw.pl

STRESZCZENIE: Celem badań było wyznaczenie charakterystyk naprężenie – odkształcenie stali VP159 oraz LH556 przy różnych prędkościach odkształcania. Do badań w zakresie obciążeń statycznych zastosowano serwohydrauliczną maszynę wytrzymałościową, natomiast w zakresie obciążeń dynamicznych metodą pręta Hopkinsona. Otrzymane rezultaty przedstawiono w formie wykresów rzeczywistego naprężenia w funkcji rzeczywistego odkształcenia. Na podstawie statycznej próby rozciągania wyznaczono również podstawowe parametry badanych materiałów, takie jak: E , $R_{0,05}$, $R_{0,2}$, R_m . Na podstawie badań stwierdzono, że stal VP159 posiada znacznie lepsze niż w przypadku LH556 właściwości plastyczne, natomiast pozostałe parametry i charakterystyki były zbliżone. Otrzymane wyniki można wykorzystać do wyznaczenie parametrów równań konstytutywnych opisujących termomechaniczne właściwości materiałów na potrzeby symulacji komputerowych.

SŁOWA KLUCZOWE: pręt Hopkinsona, duże prędkości odkształcania, stal, charakterystyka naprężenie odkształcenie

1. Wstęp

Celem przeprowadzonych badań było wyznaczenie charakterystyki naprężenie-odkształcenie, wybranych materiałów stosowanych na modułowe osłony balistyczne, przy różnych prędkościach odkształcania. Przedmiotem badań były stale typu: VP159 oraz LH556.

2. Metodyka badawcza

Badania statyczne zostały przeprowadzone z wykorzystaniem serwohydraulicznej maszyny wytrzymałościowej Instron typu 8802. Testy w warunkach obciążeń rozciągających zostały przeprowadzone na próbkach płaskich, których część pomiarowa miała 6,20 mm szerokości i 3,10 mm grubości, wykonanych metodą obróbki skrawaniem. Do pomiaru odkształcania zastosowano ekstensometr elektromechaniczny o długości bazowej 25 mm. Maszyna pracowała w trybie kontroli odkształcania mierzonego na ekstensometrze, przy prędkości 1 mm/min, co daje prędkość odkształcania $6,6 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. Badania w warunkach obciążeń ściskających przeprowadzono tylko dla materiału LH556 na próbkach o kształcie cylindrycznym o średnicy 10,00 mm i wysokości 15,00 mm.

Do badań dynamicznych zastosowano metodę dzielonego pręta Hopkinsona [1]. Stanowisko było wyposażone w pręty inicjujący i transmisyjny o długości 1 m i średnicy 20 mm, na które w połowie długości naklejono symetrycznie po 4 tensometry elektrooporowe umożliwiające pomiar sprężystej fali wzdłużnej propagującej się wzdłuż prętów. Rejestrowane przebiegi czasowe odkształcania, mierzone za pomocą tensometrów,

zapisywano na oscyloskopie cyfrowym. Korzystając ze wzorów:

$$\delta = E \left(\frac{A}{A_S} \right) \varepsilon_T, \quad (1)$$

$$\varepsilon = -\frac{2C_0}{L} \int \varepsilon_R dt, \quad (2)$$

$$\dot{\varepsilon} = \frac{d\varepsilon(t)}{dt} = \frac{-2C}{L} \varepsilon_R(t), \quad (3)$$

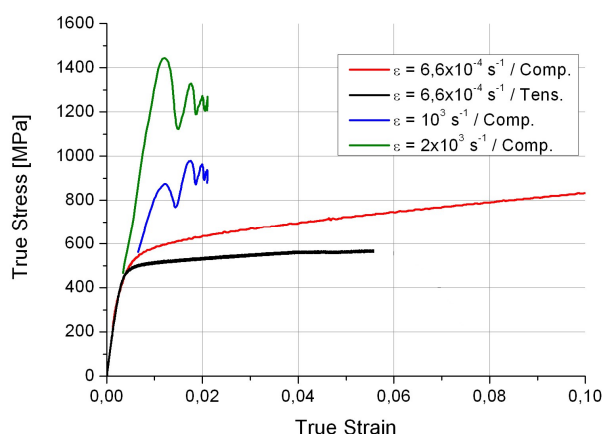
na podstawie przebiegu fali przechodzącej ε_T , odbitej ε_R , powierzchni przekroju porzecznego prętów A i próbki A_S , prędkości rozchodzenia fali sprężystej w materiale prętów C_0 oraz długości próbki L , można wyznaczyć przebiegi czasowe naprężenia σ , odkształcania ε i prędkości odkształcania $\dot{\varepsilon}$ w próbce.

3. Wyniki badań

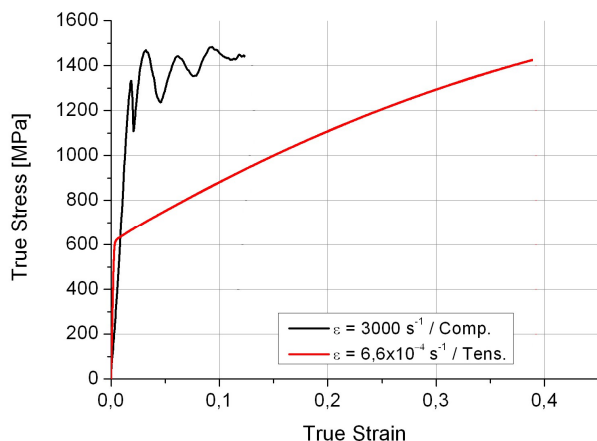
Wyniki badań właściwości mechanicznych stali LH556 przedstawiono na rys. 1. Zawiera on charakterystyki uzyskane z prób statycznego ściskania i rozciągania oraz dynamicznego ściskania. Badania z zastosowaniem metody Hopkinsona zostały przeprowadzone przy dwóch prędkościach odkształcania: $\dot{\varepsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ oraz $\dot{\varepsilon} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Materiał charakteryzuje się słabymi właściwościami plastycznymi. Jego uszkodzenie w statycznej próbie rozciągania następowało już przy odkształceniu 0,06. Na wykresie statycznego ściskania można zaobserwować efekt umocnienia plastycznego, którego charakter określa współczynnik nachylenia wynoszący ok. 2000 MPa. Badany materiał charakteryzuje się dużą czułością naprężenia

plastycznego płynięcia na prędkość odkształcania. W zakresie dynamicznym naprężenie plastycznego płynięcia wzrasta z 900 MPa do 1200 MPa dla prędkości odpowiednio: $\dot{\epsilon} = 10^3 \text{ s}^{-1}$ oraz $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$.

Dla stali VP159 przeprowadzono próbę statycznego rozciągania oraz dynamicznego ściskania. Stal ta charakteryzuje się znacząco lepszymi właściwościami plastycznymi w stosunku do stali LH556. Zerwanie w próbie rozciągania nastąpiło przy odkształceniu $\epsilon = 0,4$. Współczynnik umocnienia plastycznego wynosi podobnie, jak dla LH556 ok. 2000 MPa. Badania dynamiczne zostały przeprowadzone przy prędkości odkształcania $\dot{\epsilon} = 3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. Ze wzrostem prędkości odkształcania następuje wyraźny wzrost naprężenia plastycznego płynięcia.



Rys. 1. Charakterystyki naprężenie-odkształcenie stali LH556 w warunkach obciążeń statycznych ściskających i rozciągających oraz dynamicznych ściskających



Rys. 2. Charakterystyki naprężenie-odkształcenie stali VP159 w warunkach obciążeń statycznych rozciągających oraz dynamicznych ściskających

Podstawowe parametry wyznaczone na podstawie charakterystyki statycznego rozciągania przedstawiono w tabeli 1. Moduł sprężystości podłużnej E oraz granica sprężystości $R_{0,05}$ i umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ są ok. 25% większe dla stali VP159, natomiast wytrzymałość na rozciąganie R_m mimo podobnego współczynnika umocnienia plastycznego wynosi 979 MPa dla stali VP159 i 518 MPa dla stali LH556, co jest spowodowane dużą różnicą właściwości plastycznych obu materiałów.

Tabela 1. Wyznaczone parametry materiałowe

Materiał	E [GPa]	$R_{0,05}$ [MPa]	$R_{0,2}$ [MPa]	R_m [MPa]
VP159	207,0	569,4	603,4	979,3
LH556	201,0	441,0	488,1	518,4

4. Podsumowanie

W trakcie badań metodą pręta Hopkinsona zastosowano stosunkowo niskie prędkości odkształcania ($\dot{\epsilon} = 3 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ dla stali VP159 i $\dot{\epsilon} = 2 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$ dla stali LH556), co było podyktowane spodziewanymi wysokimi wartościami naprężenia uplastyczniającego badanych stali. W przypadku, gdyby były one porównywalne z wartościami naprężenia uplastyczniającego dla stali maraging (ok. 1900 MPa), z której wykonano pręty pomiarowe, zastosowanie wyższych prędkości odkształcania mogłoby doprowadzić do pojawienia się odkształcania plastycznego prętów i stąd do uszkodzenia stanowiska.

Zarówno stal VP159, jak i LH556 wykazują silne właściwości lepkoplastyczne, co wyraża się wzrostem naprężenia plastycznego płynięcia ze zwiększaniem prędkości odkształcania. Współczynnik umocnienia plastycznego w przypadku obu materiałów jest podobny i wynosi ok. 2000 MPa.

Stal VP159 ma znacznie lepsze właściwości plastyczne, w zestawieniu ze stalą LH556.

Na podstawie wyznaczonych charakterystyk mechanicznych można wyznaczyć równania konstytutywne [2, 3] na potrzeby symulacji komputerowych prowadzonych metodą elementów skończonych.

Praca została wykonana w ramach projektu nr O N508 4029 36 pt. „Opracowanie i badanie innowacyjnych materiałów nowej generacji na lekkie, modułowe osłony batalistyczne o wspomagającym działaniu ochronnym”.

Literatura

- [1] Kolsky, H., *An Investigation of the Mechanical Properties of Materials at Very High Rates of Loading*; In: Proc. Phys. Soc. (London), 63 pp. 676-700, 1949.
- [2] Zerilli F.J., Armstrong R.W., *Dislocation-mechanics-based constitutive relation for material dynamics calculations*, J Appl. Phys., 61, 1816-25, 1987
- [3] Johnson G.R., Cook W.H., *A constitutive model and data for metals subjected to large strain, high strain rates and high temperature*, Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics, Den Haag, The Netherlands, p. 541-3, 1983