

Jacek PAWLICKI¹, Kinga RODAK², Adam PŁACHTA³

PLASTYCZNOŚĆ WYBRANYCH MATERIAŁÓW METALICZNYCH W WARUNKACH DYNAMICZNEGO ODKSZTAŁCANIA

Streszczenie. W artykule przedstawiono charakterystykę zmodernizowanego młota rotacyjnego oraz nowego, opartego na czujnikach tensometrycznych, systemu rejestracji danych pomiarowych, który pozwolił na poprawę jakości uzyskiwanych wyników pomiarów. Na stanowisku możliwa jest realizacja prób dynamicznego rozciągania i udarowego zginania w zakresie prędkości liniowej elementu wymuszającego od 5 m/s do 40 m/s.

Wstępne badania dynamicznego odkształcania przeprowadzono dla wybranej grupy materiałów metalicznych. Badania strukturalne oraz identyfikacja przelomów pozwoliły na określenie korelacji „prędkość odkształcenia – odkształcenie – struktura”.

Słowa kluczowe: młot rotacyjny, odkształcenie dynamiczne, prędkość odkształcenia, rozciąganie, udarność

PLASTICITY OF SELECTED METALLIC MATERIALS IN DYNAMIC DEFORMATION CONDITIONS

Summary. Characteristics of a modernized flywheel machine has been presented in the paper. The laboratory stand enables to perform dynamic tensile tests and impact bending with a linear velocity of the enforcing element in the range of 5÷40 m/s. A new data acquisition system, based on the tensometric sensors, allows for significant qualitative improvement of registered signals.

Some preliminary dynamic forming tests were performed for the selected group of metallic materials. Subsequent microstructural examinations and identification of the fracture type enabled to describe a correlation between strain rate, strain and microstructure.

Keywords: flywheel machine, dynamic forming, strain rate, tension, impact strength

1. WPROWADZENIE

Obecnie możliwości przeprowadzania badań i wyznaczania charakterystyk materiałowych w warunkach dużych prędkości odkształcenia są ograniczone dostępnością aparatury badawczej, niejednoznacznością stosowanych metod i procedur obliczeniowych

¹ Faculty of Transport, The Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, e-mail: jacek.pawlicki@polsl.pl

² Faculty of Materials Engineering and Metallurgy, The Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, e-mail: kinga.rodak@polsl.pl

³ Faculty of Materials Engineering and Metallurgy, The Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, e-mail: adam.plachta@polsl.pl

oraz złożonością zjawisk towarzyszących tym sposobom odkształcania. Tym samym konstruktorzy i technolodzy nie dysponują informacjami nt. zachowania się materiału w warunkach dużych prędkości odkształcania. Potrzeba posiadania tych informacji wynika z zapotrzebowania na nowe materiały charakteryzujące się niespotykanym do tej pory zespołem właściwości wytrzymałościowych i użytkowych, by sprostać coraz ostrzejszym wymaganiom dotyczącym konstrukcji pojazdów mechanicznych i rygorystycznym warunkom przeprowadzania testów zderzeniowych [1–4]. Nadrzędność bezpieczeństwa użytkowników pojazdów mechanicznych determinuje znacząco konstrukcję współczesnego samochodu, dlatego też oczekiwania dotyczące właściwości mechanicznych i użytkowych materiałów konstrukcyjnych stają się coraz większe, a testy odbiorcze nowych materiałów muszą uwzględniać specyfikę ich pracy.

Najczęściej stosowanymi metodami oceny plastyczności materiałów są próby rozciągania, ściskania, skręcania, udarowości oraz modelowe próby spęczania i walcowania. Stosowane do ich wyznaczania m.in. standardowe maszyny wytrzymałościowe pozwalają na przeprowadzenie prób rozciągania z prędkością odkształcania do $0,1 \text{ s}^{-1}$. W próbie skręcania na plastometrze skrętnym maksymalne prędkości odkształcania są rzędu 10 s^{-1} , maksymalnie 35 s^{-1} . Nawet bardzo nowoczesny i powszechnie wykorzystywany w badaniach materiałów system badawczy „Gleeble” umożliwia przeprowadzanie prób z prędkością odkształcania w zakresie od $0,0001 \text{ s}$ do 100 s^{-1} [5]. Zakres prędkości odkształcania, określane jako „dynamiczne odkształcenie materiału”, jest bardzo szeroki. Z tego względu niemożliwa jest realizacja badań w całym zakresie na jednym urządzeniu i przy użyciu jednego typu aparatury pomiarowej. Niektóre z tych urządzeń stanowią standardowe wyposażenie laboratoriów, a próby na nich przeprowadzane są znormalizowane. Dotyczy to np. młotów wahadłowych, w przypadku których próba udarowego zginania na młotach Charpy’ego jest powszechnie znana i stosowana także w warunkach laboratoriów zakładowych. W przypadku zmodyfikowanych układów prętów Hopkinsona, gdzie uzyskuje się prędkości odkształcania w zakresie $500 \text{ s}^{-1} - 10^5 \text{ s}^{-1}$, problemem jest dostępność aparatury i złożoność procedur analizy wyników [6]. Możliwości badania materiałów z prędkościami odkształcania od 10^2 s do 10^4 s^{-1} mają młoty rotacyjne. Urządzenia te charakteryzują się zwartą konstrukcją i nieskomplikowanym sposobem przeprowadzenia próby. Dodatkową ich zaletą jest możliwość przeprowadzania badań próbek wykonanych zarówno z prętów, jak i blach. Ta uniwersalność zastosowania, duży zakres prędkości odkształcania, a także stosunkowo niski koszt wykonania próbek do badań skłaniają do poszukiwania możliwości wykorzystania tych urządzeń w badaniach materiałów [7–9].

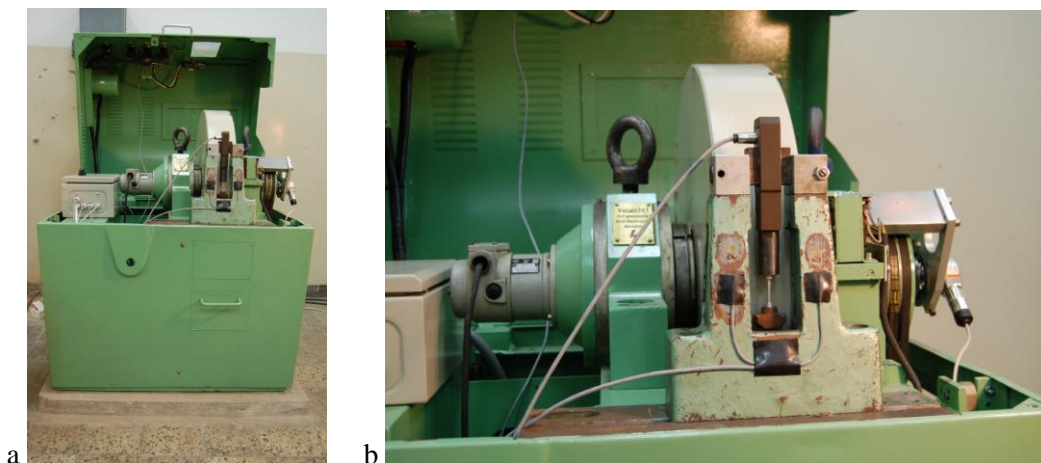
Problemem badań dynamicznego odkształcania, również przeprowadzanych na młotach rotacyjnych, jest przebieg uzyskiwanych charakterystyk siłowych i ich interpretacja. Pojawiają się poważne wątpliwości co do prawidłowości analizy wyników, szczególnie w początkowej fazie odkształcania. Czy obserwowane zróżnicowane przebiegi charakterystyk siłowych są wywołane specyfiką budowy i działania urządzenia do badań dynamicznych, konstrukcją uchwytów, kształtem próbki, umiejętnością identyfikacji i filtracji zakłóceń [10]? Powszechność wykorzystania badań dynamicznych w rozwiązaniach przemysłowych jest również uwarunkowana kosztem testów. Obecnie koszty te w porównaniu ze standardowymi (statyczna próba rozciągania, udarowego zginania itd.) są znacznie wyższe, tym samym mimo istnienia racjonalnych przesłanek do ich przeprowadzania nie obserwujemy istotnego wykorzystania wyników takich testów w procesie projektowania materiałów i nowych konstrukcji.

Uzyskanie odpowiedzi na niektóre tylko z tych pytań pozwoli na uwiarygodnienie wyników badań dynamicznego odkształcania i wykorzystanie charakterystyk materiałowych w programach symulacji komputerowej oraz w projektowaniu materiałów i nowych konstrukcji na potrzeby przemysłu samochodowego i lotniczego.

W artykule przedstawiono krótką charakterystykę zmodernizowanego stanowiska do badań dynamicznych z nowym systemem pomiarowym oraz wyniki prób odkształcania i badań mikrostrukturalnych przeprowadzonych na wybranej grupie materiałów metalicznych.

2. STANOWISKO BADAWCZE

Badania dynamicznego odkształcania zrealizowano na młocie rotacyjnym typu RSO będącym na wyposażeniu Instytutu Technologii Metali Politechniki Śląskiej. Stanowisko do badań dynamicznych przedstawiono na rys. 1. Urządzenie pozwala na rozciąganie oraz zginanie próbek z prędkością liniową uderzenia w zakresie od 5 m/s do 40 m/s, co odpowiada uzyskaniu prędkości odkształcenia w zakresie od 10^2 s^{-1} do 10^4 s^{-1} . W trakcie przeprowadzania prób dynamicznego rozciągania próbka jest połączona z górnym uchwytem i przez uderzenie bijaka (pazura) w kowadło dolnego uchwyty jest poddawana odkształceniu, natomiast podczas udarowego zginania próbka jest łamana na kowadło przy pomocy bijaka (pazura). Wymienny pazur jest zamocowany na kole zamachowym o bardzo dużym momencie bezwładności. Pomiar siły podczas przeprowadzania prób rozciągania lub zginania jest zrealizowany na podstawie tensometrycznego czujnika nacisku o nominalnym zakresie 25 kN, którego konstrukcja została przystosowana odpowiednio do zabudowy w elementach statywu lub kowadła w zależności od charakteru przeprowadzanej próby. Prędkość liniową bijaka w systemie pomiarowym wyznaczono, mierząc prędkość obrotową koła zamachowego młota. Pomiar prędkości wykonano za pomocą enkodera zabudowanego na końcówce czopu wału młota. Do kondycjonowania sygnałów wykorzystano kartę pomiarową typu PCI-BASE 1000 o częstotliwości próbkowania 500 kHz, pozwalającą na synchroniczne odczytywanie obu sygnałów co 2 μs . Do sterowania systemem i zapisu sygnału wykorzystano program Next View 4.2 firmy BMC.



Rys. 1. Stanowisko do badań dynamicznych (a), przestrzeń robocza młota rotacyjnego (b)
Fig. 1. The stand for dynamic tests (a), the workspace of the flywheel machine (b)

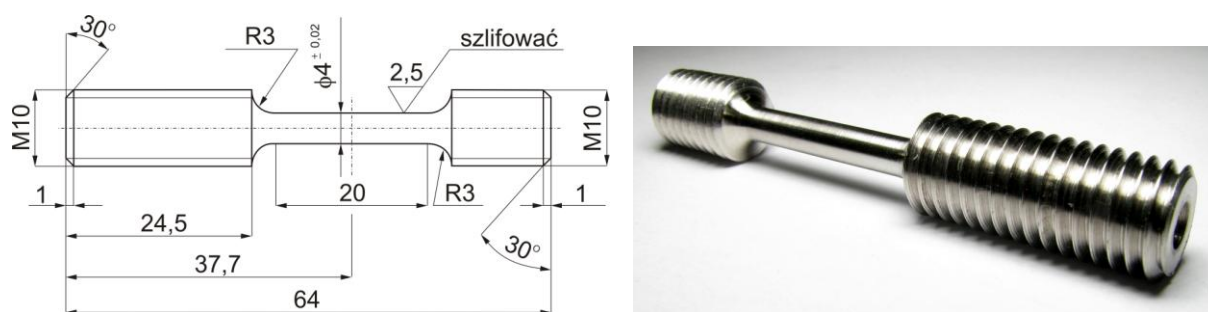
3. METODYKA BADAŃ

Badania dynamicznego odkształcania przeprowadzono w próbach rozciągania i zginania. Próbki do badań wykonano z następujących materiałów metalicznych: stali austenitycznej X3CrNi18-9, stali z efektem TRIP, stali typu DP, stopu magnezu MgAZ31, stopu aluminium PA4 i miedzi elektrolitycznej gatunku M1E. Materiały te poddano następującym zabiegom obróbki cieplnej w celu uzyskania pożądanej i jednorodnej struktury początkowej:

- stal gatunku X3CrNi18-9 – przesycanie z temperatury 1150°C/1 h/woda – struktura austenityczna,
- stal z efektem TRIP – po walcowaniu na gorąco (ostatni przepust 910°C) – struktura: ferryt + bainit + austenit szczątkowy,
- stal typu DP – hartowanie w wodzie z zakresu ferryt + austenit (temp. 810°C) – struktura: ferryt + martenzyt,
- stop magnezu MgAZ31 po walcowaniu na gorąco – wyżarzanie 350°C/1 h/powietrze,
- stop aluminium PA4 – przesycanie z temperatury 500°C/1 h/woda,
- miedź elektrolityczna gatunku M1E – wyżarzanie 550°C/2 h/pow.

W próbach rozciągania zastosowano próbki cylindryczne gładkie o średnicy 4 mm i długości części pomiarowej 20 mm, obustronnie gwintowane w części chwytowej (rys. 2). W próbach zginania udarowego zastosowano próbki znormalizowane wykonane z pręta o przekroju kwadratowym 10x10 mm i długości 55 mm, z karbem typu „v” o głębokości 2 mm. Badania te przeprowadzono dla stali X3CrNi18-9 i stopu aluminium PA4.

Próby dynamicznego odkształcania na młocie rotacyjnym przeprowadzono w zakresie prędkości liniowej bijaka 5÷30 m/s. Odpowiada to uzyskanym prędkościom odkształcania w zakresie $3 \times 10^2 \div 6,5 \times 10^3 \text{ s}^{-1}$. W trakcie prób rejestrowano przebieg siły rozciągania i zginania w zależności od czasu oraz prędkość liniową bijaka, który jest umieszczony w kole zamachowym. Z charakterystyk siłowych i pomiarów geometrii próbki przed odkształceniem i po odkształceniu wyznaczono: odkształcenie graniczne ε_g , prędkość odkształcania $\dot{\varepsilon}$, wytrzymałość na rozciąganie R_m i udarność U .



Rys. 2. Próbka cylindryczna gładka do prób dynamicznego rozciągania

Fig. 2. The smooth cylindrical sample for dynamic tensile tests

Odkształcenie graniczne wyznaczono z zależności:

$$\varepsilon_g = 2 \ln \frac{d_0}{d_1} \quad (1)$$

gdzie:

ε_g – odkształcenie graniczne,

d_0 – średnica początkowa próbki [mm],

d_1 – minimalna średnica próbki po zerwaniu [mm].

Prędkości odkształcenia odpowiadające zadany prędkościom liniowym bijaka obliczono ze stosunku odkształcenia granicznego ε_g do czasu trwania próby t :

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\varepsilon_g}{t} \quad (2)$$

gdzie:

$\dot{\varepsilon}$ – prędkość odkształcenia [s^{-1}],

ε_g – odkształcenie graniczne,

t – czas [s].

Udarność określono z zależności:

$$U = \frac{L_u}{A} \quad (3)$$

gdzie:

U – udarność [J/cm^2],

L_u – praca odkształcenia przy zerwaniu [J],

A – przekrój początkowy próbki [cm^2].

Niezależnie od dynamicznych prób odkształcania przeprowadzono próby rozciągania w warunkach statycznych oraz zginania na młocie wahadłowym typu Charpy o początkowej energii uderzenia 300 J. W próbach zginania na młocie wahadłowym stosowano znormalizowane próbki, które wykorzystywano również w badaniach zginania na młocie rotacyjnym. Wyniki badań stanowiły poziom odniesienia dla wyników uzyskanych dla dużych prędkości odkształcenia.

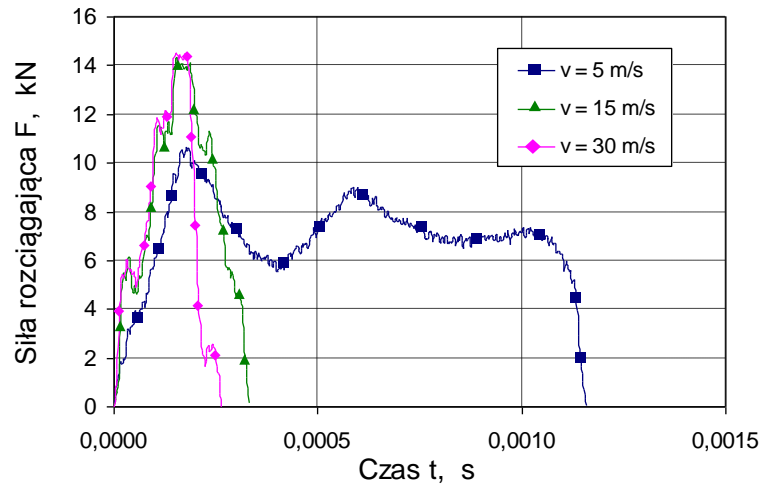
Ocena strukturalna materiałów obejmowała badania mikrostrukturalne, które przeprowadzono z wykorzystaniem mikroskopu świetlnego Olympus GX71, i mikrofraktograficzne na mikroskopie skaningowym Hitachi S-3400 N. Badania mikrostrukturalne wykonano na wzdłużnych płaszczyznach przekroju próbki. Preparatykę metalograficzną dostosowano do rodzaju materiału, np. próbki ze stali austenitycznej X3CrNi18–9 trawiono w roztworze o składzie: 3 cz. gliceryny, 2 cz. HF, 1 cz. HNO₃. Badania mikrostrukturalne skoncentrowano w obszarach lokalizacji odkształcenia, w pobliżu występowania przełomów, porównując je z efektami strukturalnymi uzyskanymi w próbkach odkształcanych w warunkach statycznych. Przeprowadzono również pomiary mikrotwardości w obszarach lokalizacji odkształcenia oraz ocenę kształtu tworzącego się przewężenia (szyjki). Wyniki badań mikrofraktograficznych pozwoliły na ustalenie morfologii przełomów otrzymanych w próbach dynamicznego rozciągania oraz w warunkach statycznego przebiegu odkształcenia.

4. WYNIKI BADAŃ

Przykładowe przebiegi rejestrowanych sił rozciągania F dla stali TRIP przedstawiono na rys. 3. Czas rejestracji sygnału pomiarowego w systemie wynosi 10 s, a pojemność pojedynczego pliku danych to 20 MB.

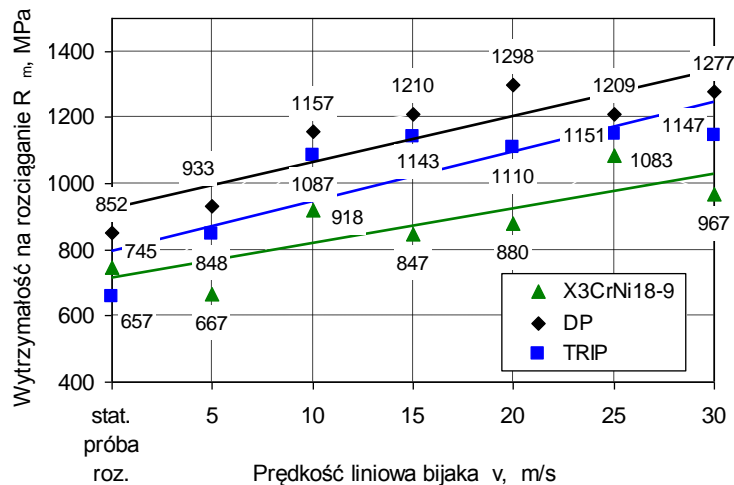
Zależność wytrzymałości na rozciąganie stali X3CrNi18–9, TRIP i DP od prędkości odkształcenia przedstawiono na rys. 4. Szczególną czułością na prędkość odkształcenia, określoną wzrostem wytrzymałości na rozciąganie, charakteryzują się stale TRIP i DP. Stal austenityczna X3CrNi18–9 nie wykazuje tak znacznego umocnienia, co potwierdziły badania

mikrotwardości. Nie zaobserwowano istotnych różnic twardości w obszarze szyjki w porównaniu z próbką odkształcaną w warunkach statycznych. Twardość próbki statycznie rozciąganej wynosiła 387,7 HV5, natomiast w próbce dynamicznie rozciąganej z prędkością liniową $v = 30$ m/s odnotowano twardość wynoszącą 387 HV5.



Rys. 3. Zmiany siły rozciągania w zależności od czasu dla stali TRIP przy prędkościach liniowych bijaka: $v = 5$ m/s, $v = 15$ m/s, $v = 30$ m/s

Fig. 3. Variation in tensile force with time for TRIP steel at linear rate of impact hammer: $v = 5$ m/s, $v = 15$ m/s, $v = 30$ m/s



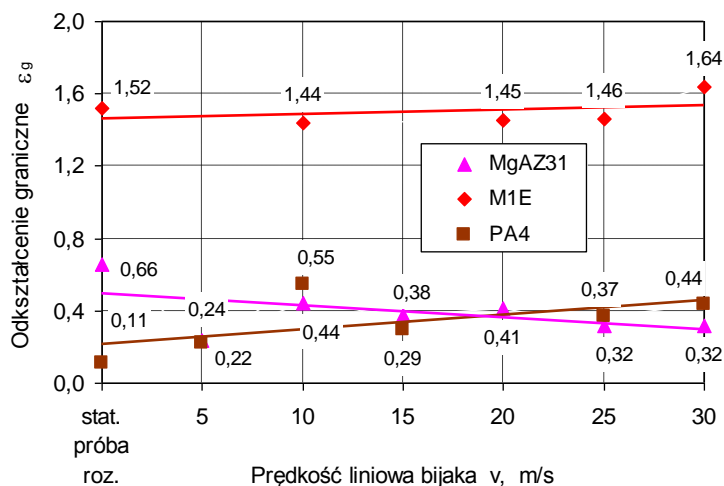
Rys. 4. Wytrzymałość na rozciąganie jako funkcja prędkości liniowej bijaka dla stali X3CrNi18-9, DP, TRIP

Fig. 4. Tensile strength as a function of linear rate of impact hammer for X3CrNi18-9, DP, TRIP steels

W próbach dynamicznego rozciągania MgAZ31, M1E, PA4 zaobserwowano większą czułość na prędkość odkształcenia miedzi w porównaniu ze stopami aluminium i magnezu. W stopach MgAZ31 i PA4 tendencja wzrostu umocnienia (wytrzymałości na rozciąganie) jest nieznaczna w całym zakresie prędkości liniowej bijaka.

Odkształcenie graniczne stali TRIP i DP mimo wzrostu umocnienia (wzrost wytrzymałości na rozciąganie) wykazuje tendencję narastającą, dla stali X3CrNi18-9 zaś

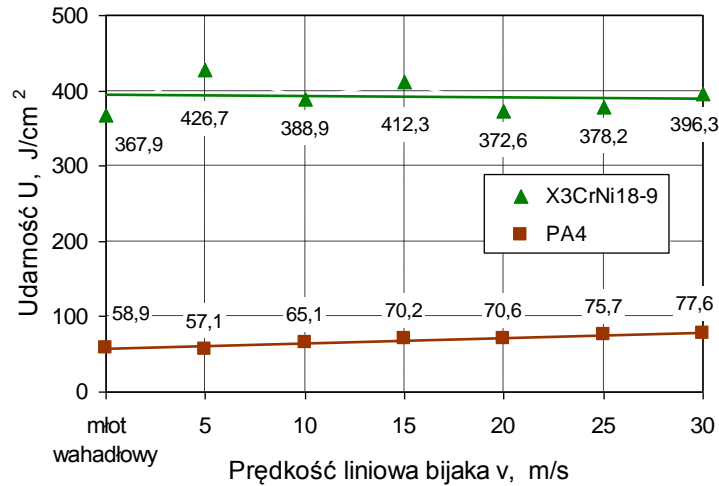
wyraźnie maleje ze zwiększeniem prędkości odkształcenia. Wartości odkształcenia granicznego dla stali typu DP są znacząco większe od pozostałych stali. Wzrost odkształcenia granicznego zaobserwowano dla miedzi i stopu aluminium (rys. 5). Odkształcenie graniczne stopu magnezu maleje ze wzrostem prędkości odkształcenia. Wartość odkształcenia granicznego miedzi jest znacznie większa w porównaniu ze stopami aluminium i magnezu.



Rys. 5. Odkształcenie graniczne jako funkcja prędkości liniowej bijaka dla MgAZ31, M1E, PA4
Fig. 5. Limit of deformation as a function of linear rate of impact hammer for MgAZ31, M1E, PA4

Wyniki badań udarności w próbach dynamicznego zginania wykazały nieznaczny spadek udarności stali X3CrNi18–9 wraz ze wzrostem prędkości liniowej bijaka, udarność stopu aluminium zaś rośnie i jest istotnie większa od udarności wyznaczonej na młocie wahadłowym (rys. 6).

Badania mikrofraktograficzne stali X3CrNi18–9, TRIP, DP wykazały ciągłą postać przełomów próbek rozciąganych w warunkach statycznych oraz odkształczanych dynamicznie niezależnie od prędkości liniowej bijaka. W morfologii przełomów obserwowano charakterystyczne dołki dla pęknięcia ciągłego oraz pęknięcia przebiegające poprzez ziarna po płaszczyznach łupliwości (rys. 7). W stali DP zaobserwowano znaczną ilość wydzielen węglików. W przypadku pozostałych materiałów (MgAZ31, M1E, PA4) charakter przełomów był zróżnicowany. W próbkach z miedzi elektrolitycznej przełomy mają charakter ciągły w całym zakresie prędkości odkształcenia. W stopie aluminium PA4 dla wszystkich prędkości odkształcenia występuje przełom mieszany. Widoczne są obszary przełomu kruchego. Podobnie w stopie magnezu MgAZ31 dominuje przełom o postaci ciągłej z obszarami o charakterze przełomu kruchego.

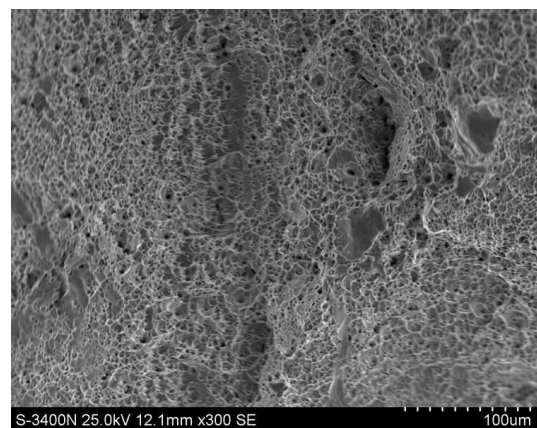
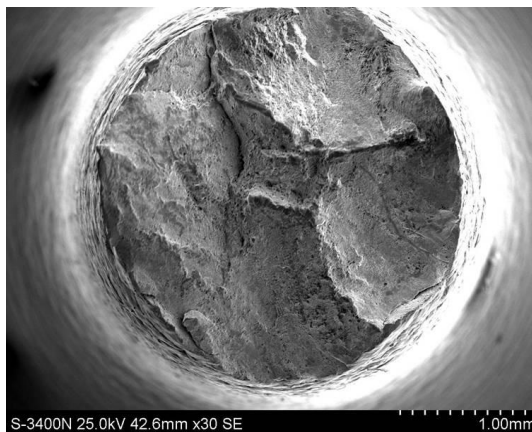


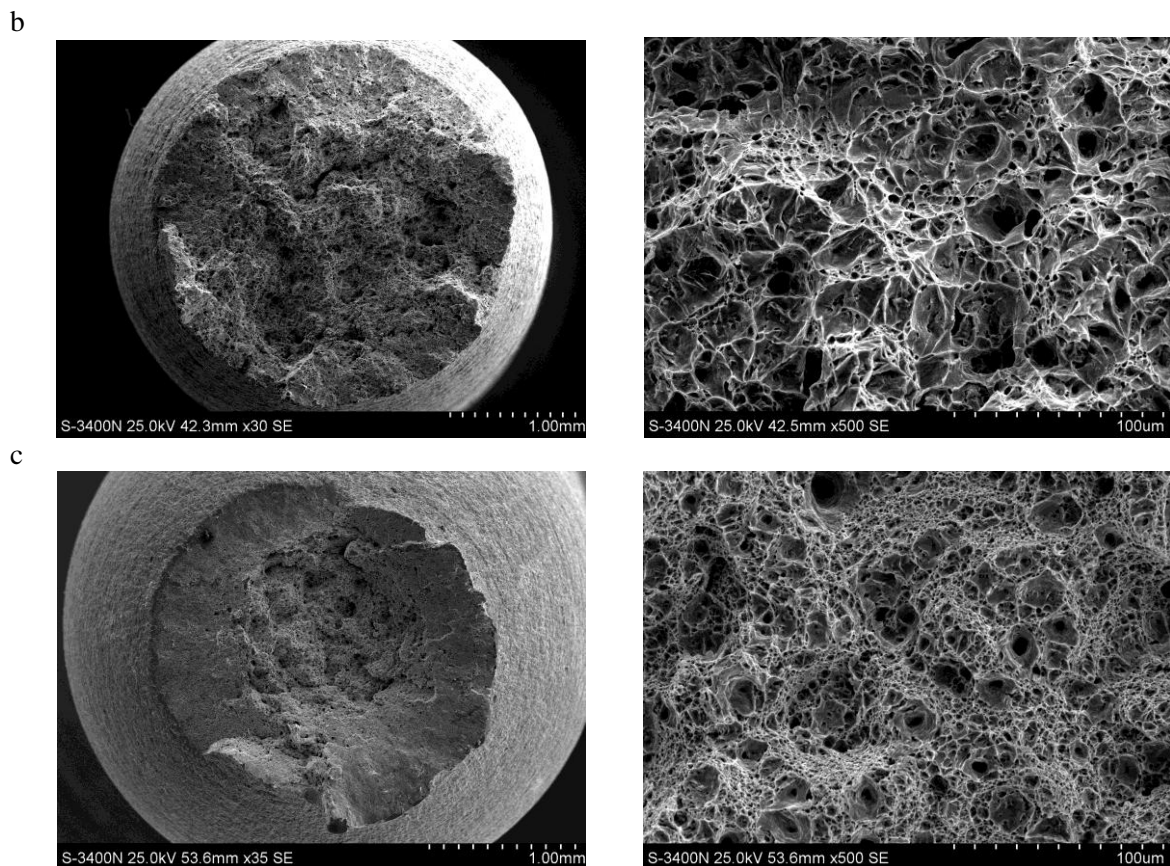
Rys. 6. Udarność jako funkcja prędkości liniowej bijaka dla stali X3CrNi18–9 i stopu aluminium PA4
 Fig. 6. The impact strength as a function of linear rate of impact hammer for X3CrNi18–8 steel and PA4 aluminium alloy

5. PODSUMOWANIE

Opracowany system pomiarowy młota rotacyjnego spełnia wymagania rejestracji szybkich i krótkotrwałych sygnałów siły i prędkości liniowej elementu wymuszającego. Umożliwia to jednoczesny zapis obu sygnałów, siły rozciągającej i czasu w całym zakresie prędkości liniowej bijaka. Zaproponowana metodyka badawcza jest uniwersalna, możliwa do zastosowania dla dużej grupy materiałów metalicznych, od silnie umacniających się nowoczesnych stali konstrukcyjnych stosowanych w przemyśle samochodowym po stopy metali nieżelaznych wykorzystywane w konstrukcjach lotniczych.

a





Rys. 7. Powierzchnie przełomów próbek po rozciągnięciu dynamicznym z prędkością liniową bijaka $v = 30$ m/s dla stali: a) X3CrNi18-9, b) TRIP, c) DP

Fig 7. Specimens fractures after dynamic tension with linear rate of impact hammer $v = 30$ m/s for steels: a) X3CrNi18-9, b) TRIP, c) DP

Przeprowadzone badania wybranych materiałów metalicznych wykazały istotne zmiany właściwości mechanicznych wraz ze wzrostem prędkości odkształcenia w porównaniu z wielkościami uzyskanymi w warunkach quasi-statycznych lub w standardowych próbach dynamicznych (próba udarowego zginania na młocie Charpy'ego).

Możliwości aplikacyjne nowych metalicznych materiałów konstrukcyjnych, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym i lotniczym, są coraz częściej uwarunkowane ich odpornością na obciążenia udarowe, stąd istnieje potrzeba rozwijania metod badań materiałów w warunkach dynamicznego przebiegu odkształcania, ciągłego doskonalenia technik pomiarowych, identyfikacji źródeł zakłóceń i wypracowania metod ich korekcji. Istnieje konieczność prowadzenia dalszych badań w celu opracowania zunifikowanej procedury umożliwiającej jednoznaczną ocenę wyników prób dynamicznego obciążenia uzyskanych w zróżnicowanych warunkach kinematycznych realizacji eksperymentu badawczego.

Bibliografia

1. Klepaczko J.R., Chiem G.C.Y.: On rate sensitivity of FCC metals, instantaneous rate sensitivity and rate sensitivity of strain hardening. *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 34, 1986, p. 29-54.
2. Bleck W., Larour P., Bäumer A.: High Strain Rate Tensile Testing Of Modern Car Body Steels. *Materials Forum*, Vol. 29, 2005, p. 21-28.
3. Śmiglewicz A., Pawlicki J., Niewielski G., Jabłońska M.: Wpływ prędkości odkształcenia na właściwości i strukturę wysokomanganowej stali X30MnAlSi20-4-3, *Hutnik. Wiadomości Hutnicze*, nr 8, 2012, s. 652-655.
4. Projekt Badawczy KBN Nr N507 069 32/1932. Strukturalno-mechaniczne aspekty dynamicznego odkształcania materiałów metalicznych dla przemysłu samochodowego, 2009.
5. Kuziak R.: Modelowanie zmian struktury i przemian fazowych zachodzących w procesach obróbki cieplno-plastycznej stali. Monografia, Instytut Metalurgii Żelaza, Gliwice 2005, s. 243.
6. Malinowski J., Kowalewski Z., Kruszka L.: Doświadczalna metoda oraz badania plastycznego płynięcia metali w zakresie bardzo wysokich prędkości odkształcenia. *Prace IPPT IFTR REPORTS 10/2007*.
7. Niechajowicz A., Tobota A.: Application of flywheel machine for sheet metal dynamic tensile tests. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, Vol. 8, 2008, p. 129-137.
8. Pawlicki J.: Technologiczna plastyczność metali w warunkach dużych prędkości odkształcenia. *Hutnik. Wiadomości Hutnicze*, nr 8, 2009, s. 644-646.
9. Pawlicki J.: Technologiczna plastyczność metali w warunkach dynamicznego odkształcania. *Rudy i Metale Nieżelazne*, R. 54, nr 11, 2009, s. 798-802.
10. Wong C.: IISI-AutoCo Round-Robin Dynamic Tensile Testing Project, International Iron and Steel Institute, 2005.