



Wpływ cyklicznego skręcania na właściwości mechaniczne materiałów w próbie rozciągania

TADEUSZ SZYMCZAK¹, ZBIGNIEW L. KOWALEWSKI^{1,2}

¹Instytut Transportu Samochodowego, Centrum Badań Materiałowych i Mechatroniki,
03-301 Warszawa, ul. Jagiellońska 80, tadeusz.szymczak@its.waw.pl

²Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Zakład Wytrzymałości Materiałów,
02-106 Warszawa, ul. Pawińskiego 5B, zkowalew@ippt.gov.pl

Streszczenie. W pracy zamieszczono wyniki z badań doświadczalnych dotyczących określania wpływu obciążenia skręcającego o charakterze cyklicznym na przebieg wyznaczonej jednocześnie charakterystyki rozciągania następujących materiałów: stali P91, stopu aluminium PA7 oraz miedzi M1E. Testy przeprowadzono na cienkościennych, osiowosymetrycznych próbkach rurkowych w warunkach płaskiego stanu naprężenia przy sterowaniu sygnałami odkształcenia. Wyznaczono zmiany granicy proporcjonalności, plastyczności i stycznego modułu wzmocnienia w zależności od amplitudy odkształcenia postaciowego oraz opracowano przebiegi zmian naprężeń głównych i kąta obrotu ich kierunków.

Słowa kluczowe: mechanika eksperymentalna, obciążenie złożone, obciążenie cykliczne, właściwości mechaniczne, rozciąganie, skręcanie

1. Wprowadzenie

Wpływ cyklicznie zmiennego momentu skręcającego na odkształcanie się materiałów wskutek rozciągania lub ściskania był badany szczegółowo przez zespół Korbla i Bochniaka [1-3] w zakresie dużych deformacji. W wyniku zastosowania rewersyjnego skręcania uzyskano kilkukrotne obniżenie sił wytwórczych, tzw. efekt KOBO. Zaproponowana metoda umożliwiła zmodyfikowanie procesu wytwarzania odkuwek stożkowych kół zębatach [4], w którym przez przyłożenie obciążenia skręcającego do stempla wykonującego jednocześnie ruch postępowy uzyskano trzykrotne zmniejszenie siły w porównaniu do klasycznego procesu kucia.

Modyfikacjom poddano także proces wyciskania [5, 6], w którym z kolei moment skręcający zastosowano do matrycy, natomiast do stempla przyłożono siłę osiową wymuszającą jego ruch postępowy. Również i w tym przypadku nastąpiła korzystna zmiana parametrów procesu, która była widoczna w postaci 30% zredukowania siły wyciskającej w porównaniu do metody standardowej. Metoda KOBO znajduje również zastosowanie w produkcji regularnych profili cienkościennych, takich jak: nity, rury czy detale o przekroju poprzecznym w kształcie elipsy [7]. Wyroby wytworzone przy użyciu tej techniki są jednak niedoskonałe ze względu na brak powtarzalności kształtu, wymaganej jakości stanu warstwy wierzchniej, regularności struktury i określonych wymiarów ziaren [8]. Duże znaczenie w uzyskiwaniu wymaganej jakości produktu odgrywają parametry obciążenia skręcającego, spośród których należy wymienić: częstotliwość [9, 10] oraz amplitudę [8, 11, 12]. Wzrost tych wielkości powoduje postępujące obniżanie się naprężenia i zmniejszanie się ciągliwości w kierunku działającej siły osiowej [9].

Oprócz rozwijania sposobów modyfikacji procesów technologicznych przy wykorzystaniu obciążenia skręcającego, badany jest również jego wpływ na różne parametry mechaniczne materiałów np. [13-16]. W doświadczeniach tych stosuje się różne warianty obciążenia i ocenia się skutki ich działania. W zakresie tego rodzaju testów można przykładowo wymienić badania: zmian pętli histerezy, warunków osiągnięcia stanu nasycenia [13] i zmian naprężenia osiowego [15, 16] bądź żywotności i wytrzymałości zmęczeniowej [14]. Należy jednak zaznaczyć, że nie wszystkie dotychczasowe wyniki doświadczalne potwierdzają zaobserwowane przez niektórych badaczy istotne zmiany podstawowych parametrów materiałowych, takich jak: granica plastyczności, granica wytrzymałości doraźnej, np. [17, 18]. Ponadto, zdecydowana większość badań doświadczalnych w tym zakresie była prowadzona przy dużych wartościach amplitudy odkształcenia cyklicznie zmiennego. Dlatego też celem niniejszej pracy jest zaprezentowanie wyników dokumentujących istotne obniżenie naprężenia rozciągającego i wynikających stąd zmian wartości granicy proporcjonalności i plastyczności — uzyskanych w zakresie stosunkowo niewielkich odkształceń, nieprzekraczających 1%.

2. Program badań — cele, parametry, warunki

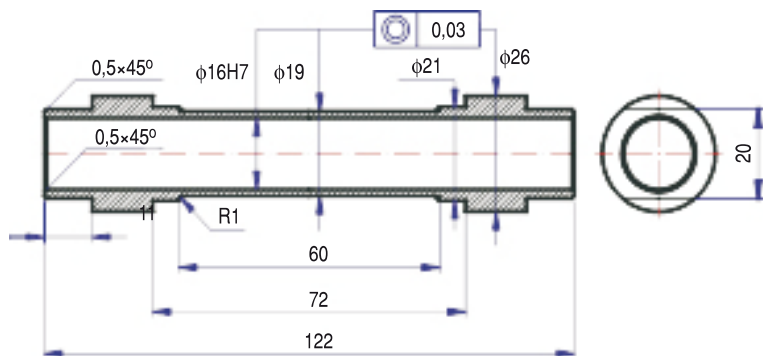
Celem programu badawczego było określenie wpływu rewersyjnie skręcającego obciążenia cyklicznego na przebieg charakterystyki rozciągania wyznaczonej w tym samym czasie i w konsekwencji zmianę granicy proporcjonalności (R_H) i umownej granicy plastyczności ($R_{0,2}$). Do badań wytypowano powszechnie dostępne materiały stosowane w różnych gałęziach przemysłu, a mianowicie: stal P91 (energetyka), stop aluminium PA7 (lotnictwo) oraz miedź M1E (elektrotechnika) o właściwościach zamieszczonych w tabeli 1.

TABELA 1

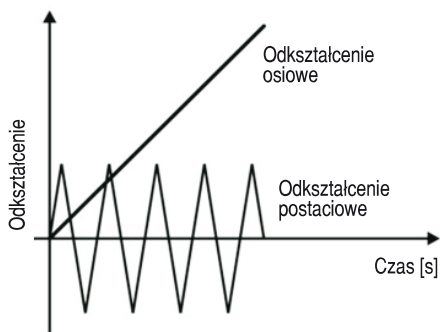
Właściwości mechaniczne materiałów w stanie dostawy

Stal P91		Stop PA7		Miedź M1E	
R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]	R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]	R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]
400	490	400	460	175	240

Badania przeprowadzono na dwuosiowej serwohydraulicznej maszynie wytrzymałościowej, stosując cienkościenne, osiowoosymetryczne próbki rurkowe (rys. 1), w warunkach płaskiego stanu naprężenia (σ_{xx} — naprężenie osiowe, τ_{xy} — naprężenie styczne) przy sterowaniu sygnałami odkształcenia osiowego (liniowo narastającego) i postaciowego (cyklicznie zmiennego) o przebiegu trójkątnym. Rozpatrywano cztery wartości amplitudy odkształcenia: $\pm 0,3\%$, $\pm 0,5\%$, $\pm 0,7\%$, $\pm 0,9\%$ przy częstotliwości 0,5 Hz (rys. 2). Tensometry w układzie skompensowanego temperaturowo pełnego mostka naklejonego w środkowym obszarze strefy badawczej próbki zostały wykorzystane do rejestracji zmian składowych stanu odkształcenia i naprężenia.



Rys. 1. Próбка do badania materiału w płaskim stanie naprężenia



Rys. 2. Program obciążania

W trakcie testów rejestrowano zmiany odkształcenia osiowego i postaciowego oraz odpowiadające im składowe naprężenia w funkcji czasu. Posłużyły one do opracowania przebiegów charakterystyk naprężenie–odkształcenie w kierunkach prowadzonej deformacji. Na podstawie wyznaczonych charakterystyk rozciągania, określono wartości granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności oraz opracowano ich zmiany na skutek zwiększania amplitudy odkształcenia postaciowego. Ponadto zamieszczono przebiegi w czasie następujących wielkości: naprężenia osiowego, efektywnego, głównych składowych stanu naprężenia i rotacji ich kierunków.

3. Wyniki badań i ich analiza

Zestawienie charakterystyk rozciągania (rys. 3), uzyskanych z udziałem (oznaczonych 1, 2, 3, 4) oraz bez udziału (oznaczono 0) obciążenia skręcającego, ilustruje istotne obniżenie naprężenia osiowego. Efekt ten powiększał się ze wzrostem amplitudy odkształcenia postaciowego. Na przykład dla amplitudy $\pm 0,7\%$ wyrażał się zredukowaniem granicy plastyczności, odpowiednio dla stali z 490 MPa do 145 MPa (rys. 3a, tab. 2), stopu aluminium z 460 MPa do 230 MPa (rys. 3b, tab. 2), a w przypadku miedzi z 240 MPa do 30 MPa (rys. 3c, tab. 2).

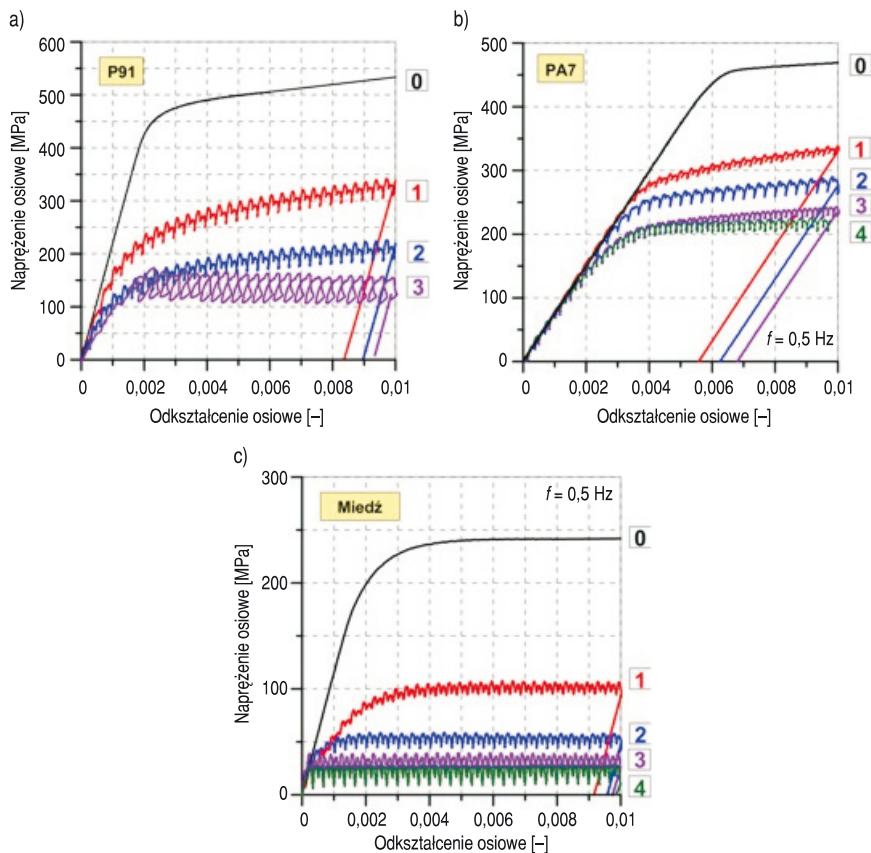
Procentowo wyrażone maksymalne obniżenie wartości granicy proporcjonalności i plastyczności wyniosło odpowiednio 75% i 70% dla stali, 70% i 50% dla stopu aluminium oraz 90% w przypadku miedzi. Stopień obniżania się wartości granicy proporcjonalności i plastyczności uzależniony był od poziomu amplitudy odkształcenia postaciowego. Im amplituda stawała się wyższa, tym mniejsze uzyskiwano wartości tych parametrów. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że intensywność spadku wartości parametrów mechanicznych stopniowo ulegała obniżeniu, dążąc do wartości asymptotycznej.

Analizie poddano także zmiany stycznego modułu wzmocnienia (rys. 4) określonego zależnością (1) oraz naprężeń głównych (rys. 5) zdefiniowanych związkiem (2):

$$E_t = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_{xx} - \sigma_{yy}}{2}\right)^2 + 4\tau_{xy}^2}, \quad (2)$$

gdzie: $\sigma_{xx}, \sigma_{yy} = 0$ — naprężenia osiowe;
 τ_{xy} — naprężenie postaciowe.



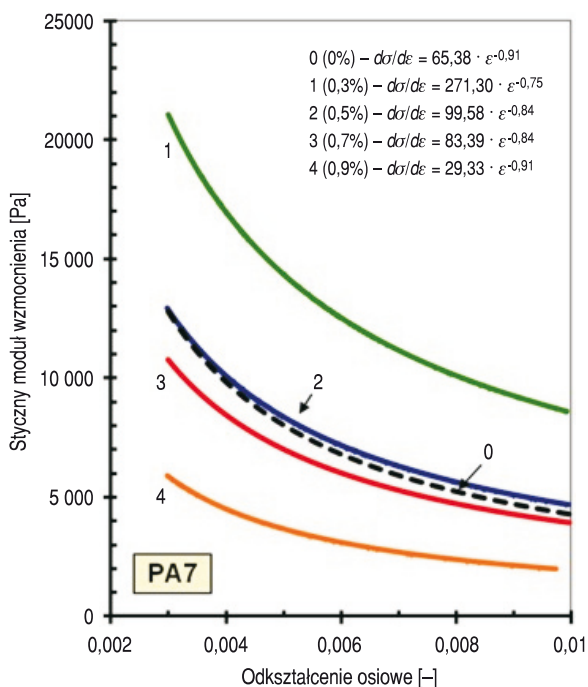
Rys. 3. Wpływ amplitudy odkształcenia postaciowego: (1) $\pm 0,3\%$, (2) $\pm 0,5\%$, (3) $\pm 0,7\%$, (4) $\pm 0,9\%$ na przebieg krzywej naprężenie–odkształcenie: (a) stali P91; (b) stopu aluminium PA7; (c) miedzi M1E; gdzie 0 — charakterystyka rozciągania bez udziału cyklu skrętnych

TABELA 2

Zmiany granicy proporcjonalności (R_H) oraz umownej granicy plastyczności ($R_{0,2}$) w: stali P91, stopie aluminium PA7 oraz miedzi M1E w zależności od amplitudy odkształcenia postaciowego

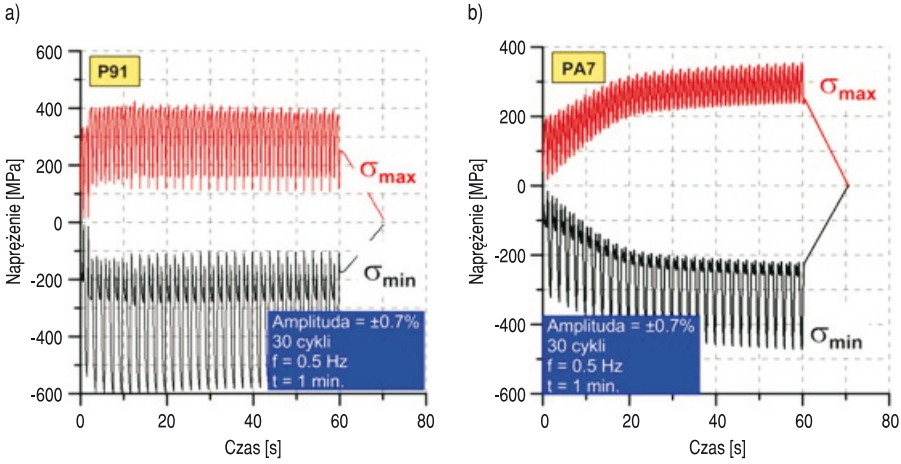
Amplituda odkształcenia postaciowego [%]	Stal P91		Stop PA7		Miedz M1E	
	R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]	R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]	R_H [MPa]	$R_{0,2\%}$ [MPa]
0	400	490	400	460	175	240
0,3	145	270	225	300	50	90
0,5	120	175	200	260	25	55
0,7	100	145	145	230	15	30
0,9	–	–	130	220	10	15

Jak wynika z rysunku 4, styczny moduł wzmocnienia ulegał zmianom dla każdej z rozpatrywanych wartości amplitudy odkształcenia postaciowego, przy czym dla największej z nich osiągał najniższe wartości. Ewolucja składowych głównych stanu naprężenia zamieszczona na rysunku 5 pokazuje, że dla badanych materiałów składowa σ_{\min} wykazała większe wahania wartości niż σ_{\max} . Charakter zmian obu składowych głównych stanu naprężenia uzależniony był od rodzaju materiału. Dla stali wahania tych wielkości przebiegały w zakresie ustalonych wartości przez cały okres trwania eksperymentu, natomiast w przypadku stopu aluminium wartości składowej σ_{\max} zwiększały się, a składowej σ_{\min} ulegały zmniejszaniu. Takie zachowanie identyfikuje w materiałach efekty umocnienia, osłabienia (rys. 5b) lub ich brak (rys. 5a).

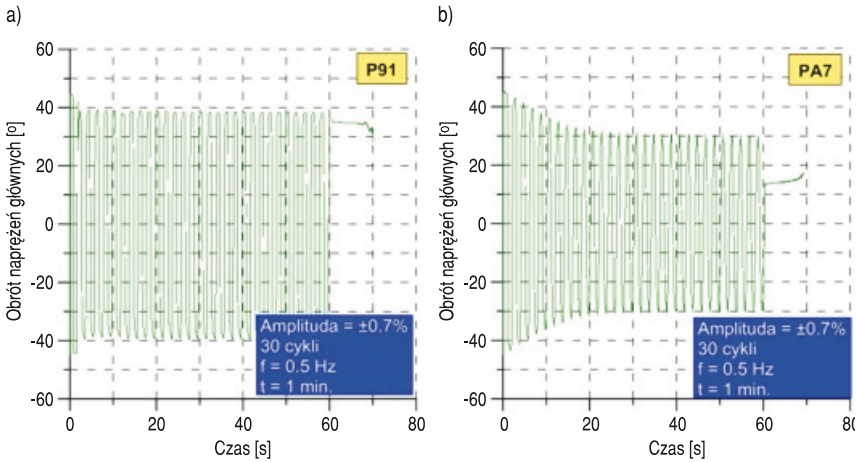


Rys. 4. Zmiana stycznego modułu wzmocnienia krzywej rozciągania stopu aluminium PA7 w funkcji odkształcenia osiowego w zależności od amplitudy odkształcenia postaciowego: (1) $\pm 0,3\%$; (2) $\pm 0,5\%$; (3) $\pm 0,7\%$; (4) $\pm 0,9\%$, (0) — z próby rozciągania bez udziału cykli skrętnych

Z cyklicznymi zmianami naprężeń głównych związany był obrót ich kierunków (rys. 6), który w przypadku stali (rys. 6a) oraz miedzi utrzymywany był na stałym poziomie w przedziale $\pm 40^\circ$. Z kolei dla stopu aluminium ewolucja tego parametru przebiegała w odmienny sposób, a mianowicie w pierwszym cyklu osiągał on wartości $\pm 40^\circ$ podobnie jak dla stali i miedzi, lecz w kolejnych cyklach zakres obrotu stopniowo zmniejszał się aż do osiągnięcia ustalonego zakresu $\pm 30^\circ$.



Rys. 5. Przebiegi naprężeń głównych (σ_{max} , σ_{min}) w czasie, podczas rozciągania i cyklicznego skręcania: (a) stali P91, (b) stopu aluminium PA7; amplituda odkształcenia postaciowego $\pm 0,7\%$



Rys. 6. Obrót naprężeń głównych w czasie, podczas rozciągania i cyklicznego skręcania: (a) stali P91, (b) stopu aluminium PA7; amplituda odkształcenia postaciowego $\pm 0,7\%$

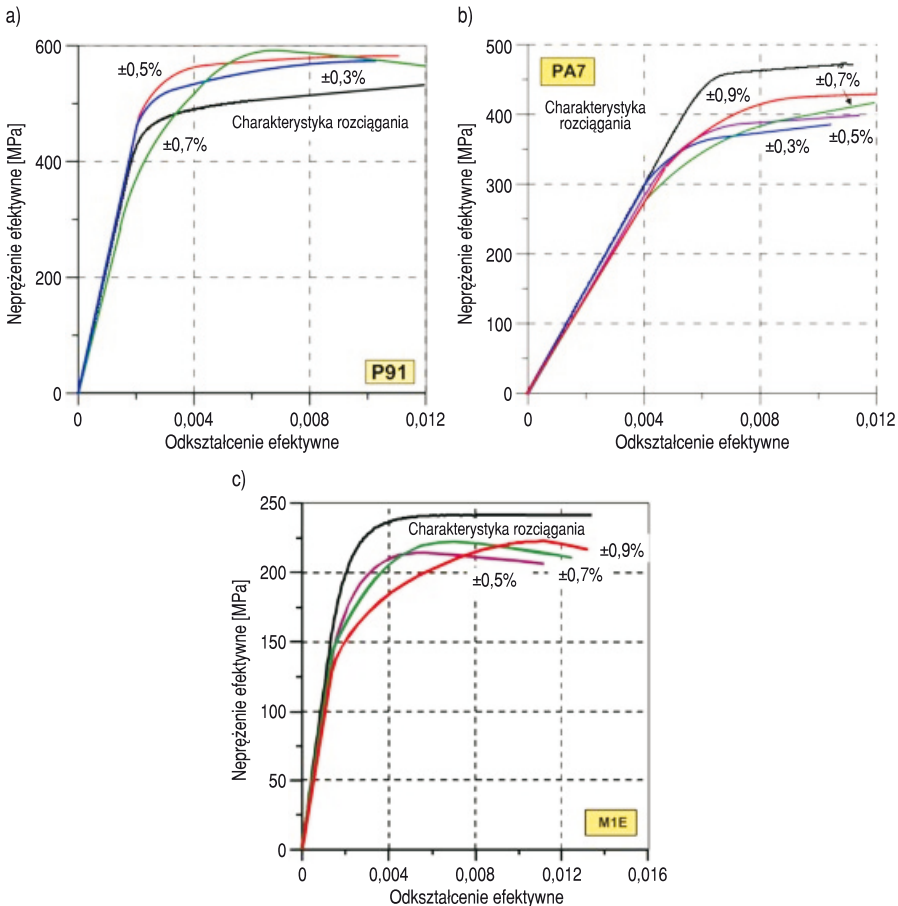
Ponieważ wszystkie próby przeprowadzono w płaskim stanie naprężenia, wygodnie było je analizować w układzie osi naprężenie efektywne (σ_e)-odkształcenie efektywne (ϵ_e) (rys. 7). Charakterystyki takie opracowano, stosując zależności wynikające z warunku Hubera-Misesa-Hencky'ego, w następującej postaci:

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + 3\tau_{xy}^2}, \tag{3}$$

$$\epsilon_e = \sqrt{\epsilon_{xx}^2 + \frac{3}{(1+\nu)^2} \epsilon_{xy}^2}, \tag{4}$$

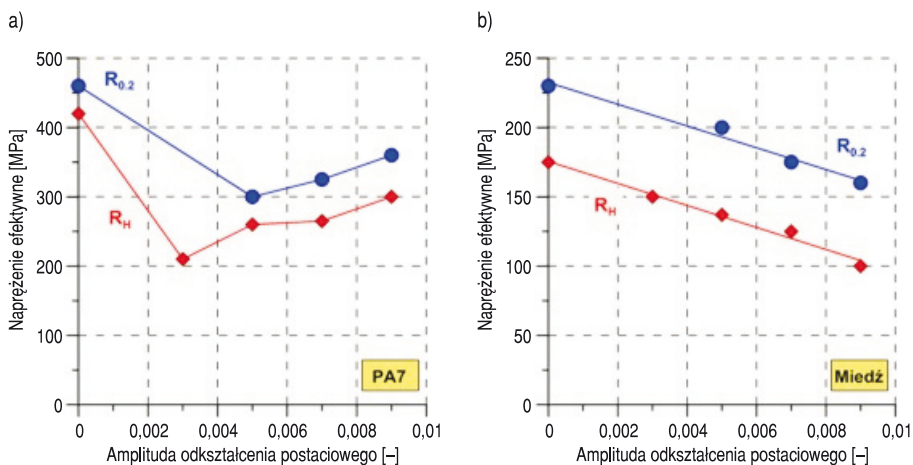
gdzie: ε_{xx} — odkształcenie osiowe;
 ε_{xy} — odkształcenie postaciowe;
 ν — współczynnik Poissona.

W przypadku stali (rys. 7a) krzywe w układzie $\sigma_e = f(\varepsilon_e)$ były położone powyżej charakterystyki uzyskanej z prostego rozciągania. Zaobserwowano niewielkie podnoszenie się charakterystyki ze wzrostem amplitudy cyklicznego obciążenia skręcającego. Tego rodzaju efekt nie był widoczny podczas obciążania stopu aluminium (rys. 7b) i miedzi (rys. 7c). Dla obu materiałów charakterystyki $\sigma_e = f(\varepsilon_e)$ były położone poniżej ich krzywych jednoosiowego rozciągania, przy czym wzrost amplitudy odkształcenia postaciowego powodował zbliżanie się ich położenia do wyjściowych krzywych rozciągania.



Rys. 7. Porównanie krzywej jednoosiowego rozciągania z charakterystykami efektywnymi dla testów z kombinacją obciążeń ((a) stali P91; (b) stopu aluminium PA7; (c) miedzi M1E) dla wartości amplitudy odkształcenia postaciowego z zakresu od $\pm 0,3\%$ do $\pm 0,7\%$

Na podstawie charakterystyk zamieszczonych na rysunku 7 obliczono wartości granicy proporcjonalności i plastyczności (rys. 8) oraz przeanalizowano ich zmiany w zależności od amplitudy odkształcenia cyklicznego. Niewielki wzrost wartości tych parametrów został zaobserwowany w przypadku stali, natomiast stop aluminium wykazał ich obniżenie (rys. 8a), przy czym poziom najniższy uzyskano dla najmniejszej rozpatrywanej wartości amplitudy odkształcenia postaciowego.



Rys. 8. Zmiany granicy proporcjonalności i plastyczności: (a) stopu aluminium PA7; (b) miedzi M1E w zależności od amplitudy odkształcenia postaciowego

4. Podsumowanie

W pracy zamieszczono wyniki badań, które prezentują wpływ cyklicznego obciążenia skręcającego o charakterze rewersyjnym na przebieg określonej jednocześnie charakterystyki rozciągania następujących materiałów: stopu aluminium PA7, stali P91 i miedzi M1E. Zastosowany program obciążenia spowodował istotne obniżenie granicy proporcjonalności i plastyczności na rozciąganie. Dla każdego testowanego materiału efekt ten powiększał się ze wzrostem amplitudy odkształcenia postaciowego, przy czym dla miedzi był najwyraźniejszy (ośmiokrotne obniżenie granicy plastyczności).

Zaobserwowane efekty mogą znaleźć zastosowanie przy opracowywaniu nowych technologii produkcji półfabrykatów w postaci prętów lub rur.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2009-2012 jako projekt badawczy MNiSW nr N N501 121036.

Artykuł wpłynął do redakcji 16.09.2011 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w maju 2012 r.

LITERATURA

- [1] W. BOCHNIAK, A. KORBEL, *KOBO type forming: forging of metals under complex conditions of process*, J. Mater. Proc. Tech., 134, 2003, 120-134.
- [2] W. BOCHNIAK, A. KORBEL, R. SZYNDLER, *Innovative solutions for metal forming*, Proc. Inter. Conf. MEFORM 2001 — Herstellung von Rohren und Profilen, Institut für Metallformung Tagungsband, 239, Freiberg/Riesa, 2001.
- [3] A. KORBEL, W. BOCHNIAK, *The structure based design of metal forming operations*, J. Mater. Proc. Tech., 53, 1995, 229-237.
- [4] W. BOCHNIAK, A. KORBEL, R. SZYNDLER, R. HANARZ, F. STALONY-DOBRAŃSKI, L. BŁAŻ, P. SNARSKI, *New forging method of bevel gears from structural steel*, J. Mater. Proc. Tech., 173, 2006, 75-83.
- [5] L.X. KONG, P.D. HODGSON, *Constitutive modelling of extrusion of lead with cyclic torsion*, Mater. Sci. Eng., A 276, 2000, 32-38.
- [6] L.X. KONG, P.D. HODGSON, B. WANG, *Development of constitutive models for metal forming with cyclic strain softening*, J. Mater. Proc. Tech., 89-90, 1999, 44-50.
- [7] W. BOCHNIAK, K. MARSZOWSKI, A. KORBEL, *Theoretical and practical aspects of the production of thin-walled tubes by the KOBO method*, J. Mater. Proc. Tech., 169, 2005, 44-53.
- [8] Z. CYGANEK, F. GROSMAN, *Wpływ parametrów walcowania z cykliczną zmianą schematu obciążenia na kształt pasm walcowanych oraz wielkość uzyskanego odkształcenia*, XIV Seminarium Naukowe „Nowe Technologie i Materiały w Metalurgii i Inżynierii Materiałowej”, Katowice, 19 maja 2006, 45-50.
- [9] G. NIEWIELSKI, D. KUC, K. RODAK, F. GROSMAN, J. PAWLICKI, *Influence of strain on the copper structure under controlled deformation path conditions*, Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering, 17, 1-2, 2006, 109-112.
- [10] M. XIANG, *Compression and extrusion of metals using rotating dies*, rozprawa doktorska, Deakin University, Norwegia, 2003.
- [11] M.T.P. AGUILAR, P.R. CETLIN, P.E. VALLE, E.C.S. CORREA, J.L.L. REZENDE, *Influence of strain path in the mechanical properties of drawn aluminum alloy bars*, J. Mater. Proc. Tech., 80-81, 1998, 376-379.
- [12] Z. GRONOSTAJSKI, K. JAŚKIEWICZ, *The effect of complex strain path on the properties of CuSi5 silicon bronze*, J. Mater. Proc. Tech., 155-156, 2004, 1144-1149.
- [13] R. MNIF, M. KCHAOU, R. ELLEUCH, F. HALOUANI, *Cyclic behavior and damage analysis of brass under cyclic torsional loading*, J. Fail. Anal. and Preven., 2007, 450-455.
- [14] E. BAYRAKTAR, H. XUE, F. AYARI, C. BATHIAS, *Torsional fatigue behaviour and damage mechanisms in the very high cycle regime*, Archives of Materials Science and Engineering, 43, 2, 2010, 77-86.
- [15] E.C.S. CORREA, M.T.P. AGUILAR, E.M.P. SILVA, P.R. CETLIN, *The effect of sequential tensile and cyclic torsion straining on work hardening of steel and brass*, J. Mater. Proc. Tech. 142, 2003, 282-288.
- [16] Z.L. KOWALEWSKI, T. SZYMCZAK, *A role of cyclic loading at modification of simple deformation processes of metallic materials*, Acta Mechanica at Automatica, 4, 4, 2010, 51-55.
- [17] E.C.S. CORREA, M.T.P. AGUILAR, P.R. CETLIN, *The influence of cyclic straining on the work hardening behavior of AISI 304 stainless steel bars in multiple-pass drawing*, Materials Chemistry and Physics, 106, 2007, 95-101.
- [18] E.C.S. CORREA, L.D.R. FILHO MELO, M.T.P. AGUILAR, W.A. MONTEIRO, P.R. CETLIN, *The effect of cyclic straining on the drawing stress of low carbon steel bars*, Materials Chemistry and Physics, 94, 2005, 376-381.

T. SZYMCZAK, Z.L. KOWALEWSKI

**An influence of cyclic torsion on mechanical properties of materials
subjected to tensile test**

Abstract. The paper presents experimental results of tests devoted to evaluation of an influence of torsional cycles on the tensile characteristic of the following engineering materials: P91 steel, PA7 aluminium alloy, and M1E copper. All tests were carried out using thin-walled tubular specimens under biaxial stress state controlled by the strain signals. Variations of proportional limit, yield point, and tangential hardening modulus depending on amplitude of shear strain were determined. Changes of the principal stresses and rotation of their directions were also calculated.

Keywords: experimental mechanics, complex loading, cyclic loading, mechanical properties, tension, torsion

