

## Wnioski

1. Potwierdzono na stalach różnej klasy tendencję do obniżenia się odporności na pękanie korozyjne w środowisku siarkowodorowym przy obciążeniu SKPO wraz ze wzrostem twardości.

2. Wykazano, że stale o zwiększonej odporności SKPO mają wyższą odporność na pękanie zarówno w powietrzu, jak i w siarkowodorowym środowisku NACE.

3. Ustalono, że przy obciążeniach cyklicznych czas do pęknięcia przebadanych próbek maleje

8 – 10-krotnie w porównaniu z próbami przy obciążeniach statycznych.

## LITERATURA

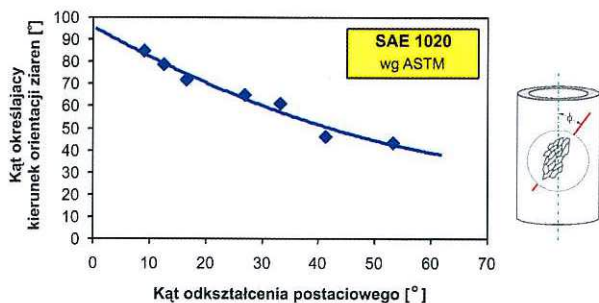
1. Mechanika zniszczenia i wytrzymałość materiałów. Pod red. W. Panasiuka, R.: Nauk. dumka, 1988, s. 1194.
2. Romaniw O., Nykyforczyn G.: Mechanika korozyjnego zniszczenia materiałów konstrukcyjnych. M: Metalurgia, 1986, s. 294.
3. NACE Standard MR-0175-96. Standard Material Requirements Sulfide Stress racking Resistance Metallic Materials for Oilfield Equipment. Houston, Tx.: National Association of Corrosion Engineers (NACE), 1996, s. 30.

# Zmiany właściwości mechanicznych materiałów w warunkach monotonicznej deformacji realizowanej w obecności obciążenia cyklicznego

ZBIGNIEW L. KOWALEWSKI  
TADEUSZ SZYMCZAK  
AGNIESZKA RUTECKA

Różnego typu obciążenia, zwłaszcza złożone, mające co najmniej dwie składowe o niezerowych wartościach, przyczyniają się do zmiany zarówno właściwości mechanicznych materiałów, w tym granicy proporcjonalności, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie, ciągliwości materiału, jak i struktury. Przykładem analizy efektów strukturalnych w materiale mogą być wyniki zamieszczone na rys. 1, prezentujące zmianę ułożenia tekstury

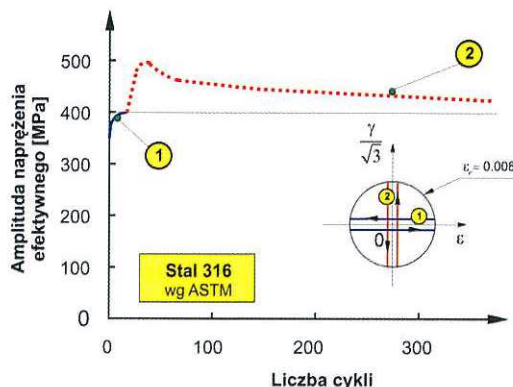
wicie poślizgi, granice poślizgów (rys. 2, [4]) czy struktury dyslokacyjne („żyłkowa”, „komórkowa”) (rys. 3, [2]) mające wpływ na właściwości mechaniczne materiału. Rozpoznanie skutków ich występowania zarówno w jednoosiowym, jak i złożonym stanie naprężenia jest istotne nie tylko w aspekcie mechaniki



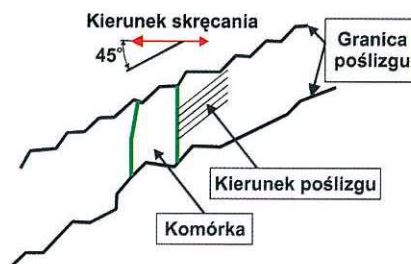
Rys. 1. Zmiany anizotropii struktury materiału w zależności od wartości deformacji postaciowej [1]

w zależności od wartości odkształcenia postaciowego, tj. z 95° w stanie początkowym na 40° dla kąta odkształcenia postaciowego równego 60° [1]. W pracach [2, 3] rozważano zmiany strukturalne wywołane działaniem momentu skręcającego, a miano-

*Prof. dr hab. inż. Zbigniew L. Kowalewski jest pracownikiem Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN oraz Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, dr inż. Tadeusz Szymczak jest pracownikiem Instytutu Transportu Samochodowego w Warszawie, dr inż. Agnieszka Rutecka pracuje w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN.*



Rys. 2. Efekty materiałowe spowodowane działaniem obciążenia skręcającego [4]

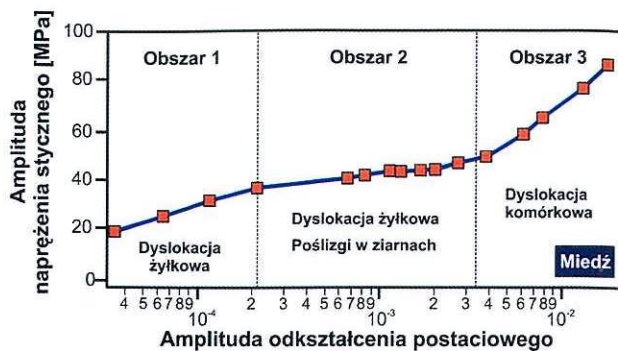


Rys. 3. Przebieg cyklicznego umacniania się miedzi w zależności od wartości amplitudy odkształcenia postaciowego oraz formowanie się charakterystycznych struktur dyslokacyjnych [2]

materiałów, lecz także w odniesieniu do procesów obróbki plastycznej – ponieważ umożliwia ono właściwe ich projektowanie z uwzględnieniem energochłonności, co w efekcie przekłada się na minimalizację kosztów wytwarzania wyrobów. Istotne jest także uzyskiwanie wyników doświadczalnych z badań bardziej zaawansowanych, co jest uwarunkowane posiadaniem odpowiedniej aparatury oraz umiejętnością projektowania programów badawczych w taki sposób, aby zmiany właściwości mechanicznych materiałów oraz ich struktur mogły być kontrolowane na wielu etapach procesu obciążeniowego.

Przykładem wyników badań doświadczalnych prezentujących znaczenie kolejności obciążenia cyklicznego w procesie umacniania się materiału są zmiany naprężenia efektywnego wskutek zastosowania, w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, ścieżek obciążenia, tj. rozciąganie-ściskanie oraz rewersyjne skręcanie o charakterze cyklicznym, realizowanych w taki sposób, że po osiągnięciu stanu nasycenia dla cykli rozciąganie-ściskanie stosowano cykle skrętne (rys. 4). Badania wykonano na cienkościennych próbkach rurkowych o następujących wymiarach w strefie badawczej: średnica wewnętrzna 22,34 mm, średnica zewnętrzna 25,4 mm, grubość ścianki 1,53 mm.

Zastosowanie takiej kombinacji obciążenia spowodowało efekt dodatkowego wzmocnienia obserwowany dla rewersyjnego skręcania, pomimo że wcześniej dla cykli rozciąganie-ściskanie osiągnięto stan nasycenia. Innym przykładem interesującego zachowania materiału w warunkach kombinacji różnych ścieżek obciążenia – realizowanego na cienkościennych próbkach rurkowych o średnicy zewnętrznej 21 mm, grubości ścianki 1 mm oraz długości bazy pomiarowej 60 mm – mogą być wyniki zamieszczone na rys. 5, prezentujące zmianę amplitudy naprężenia efektywnego w funkcji akumulowanego odkształcenia plastycznego, w zależności od rodzaju zastosowanej ścieżki obciążenia. Zestawienie zmian przebiegów amplitudy naprężenia efektywnego dla poszczególnych ścieżek obciążenia pokazuje, że wraz ze wzrostem stopnia złożoności ścieżki obciążenia, dla jednakowej wartości amplitudy odkształcenia, osiągane są wyższe wartości amplitudy naprężenia, co wskazuje na umacnianie się materiału. Zachowanie to identyfikuje także nieproporcjonalną ścieżkę obciążenia w kształcie okręgu jako drogę deformacji, która w porównaniu z proporcjonalnymi drogami obciążenia powoduje znaczne umacnianie się materiału. Wyraźnie także widać, że zastosowanie ścieżki kołowej, po osiągnięciu stanu nasycenia podczas deformacji realizowanej wzdłuż proporcjonalnej ścieżki obciążenia typu krzyżowego, skutkuje dodatkowym umacnianiem się materiału, będącego wynikiem uruchamiania nowych systemów poślizgu wynikających z rotacji kierunków głów-

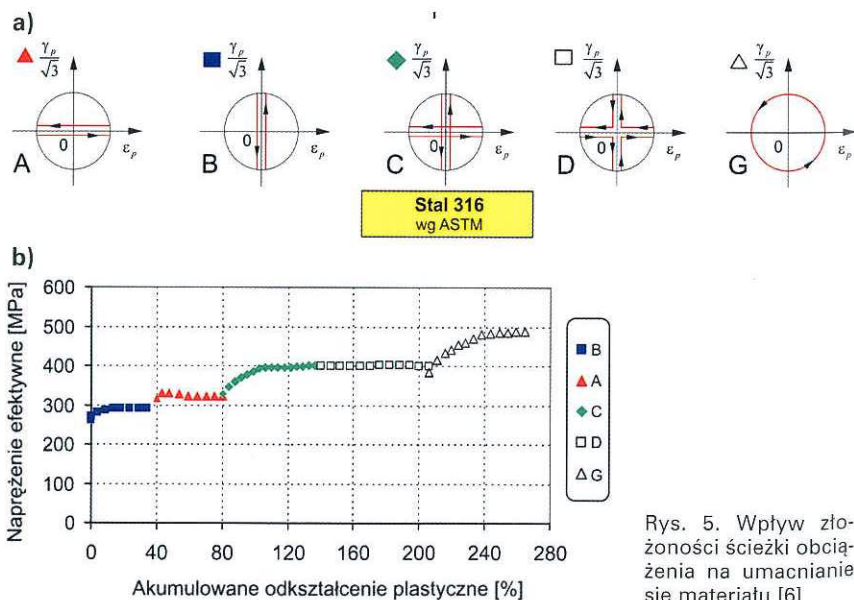


Rys. 4. Efekt dodatkowego wzmocnienia materiału dla dwóch ścieżek obciążenia o kierunkach wzajemnie prostopadłych: 1 – rozciąganie-ściskanie, 2 – rewersyjne skręcanie [5]

nych stanu naprężenia. Wyniki zamieszczone na tym rysunku w szerszym zakresie niż wyniki zaprezentowane na rys. 4 identyfikują rolę złożoności ścieżki obciążenia w procesie umacniania się materiału.

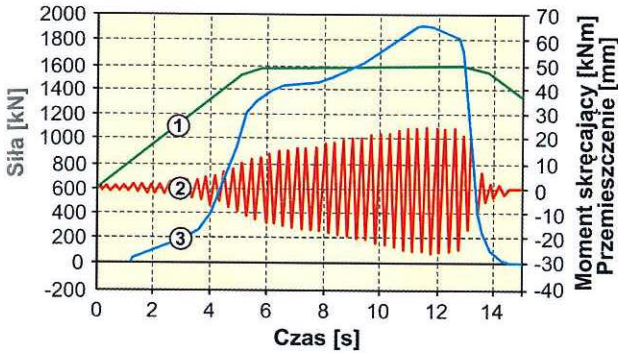
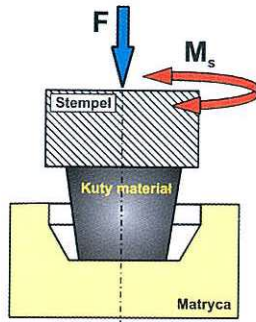
### Obciążenia złożone w procesach plastycznej obróbki materiałów konstrukcyjnych

Znany z literatury efekt charakteryzujący się znacznym obniżeniem parametrów procesu obróbki plastycznej wskutek zastosowania rewersyjnego skręcania, jest określany jako efekt KOBO [7, 8]. Efekt ten został wykorzystany między innymi w procesie kucia zębatych kół stożkowych (rys. 6), podczas którego stempel przemieszcza się monotonicznie przy jednoczesnym wykonywaniu ruchu oscylacyjnego [9]. Przykładowy schemat obciążenia charakteryzujący się stopniowym narastaniem momentu skręcającego wraz ze wzrostem siły działającej na stempel został pokazany na rys. 7. Zastosowanie takiego programu obciążenia spowodowało czterokrotny spadek wartości siły w stosunku do klasycznej metody kucia. Zaletą metody KOBO jest również fakt otrzymywania stosunkowo regularnej struktury materiału, co ma znaczenie podczas eksploatacji wyrobów uzyskiwanych tą techniką.



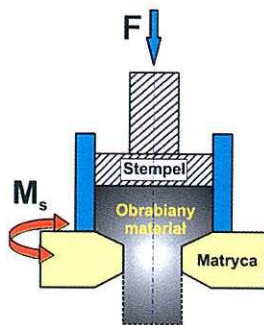
Rys. 5. Wpływ złożoności ścieżki obciążenia na umacnianie się materiału [6]

Rys. 6. Schemat metody KOBO stosowanej w procesie kucia [9]



Rys. 7. Ilustracja zmian parametrów procesu kucia stożkowych kół zębatach (stal z 0,45% C) w temperaturze 850°C przy wykorzystaniu metody KOBO: 1 – przemieszczenie stempla, 2 – moment skręcający działający na stempel, 3 – siła działająca na stempel [9]

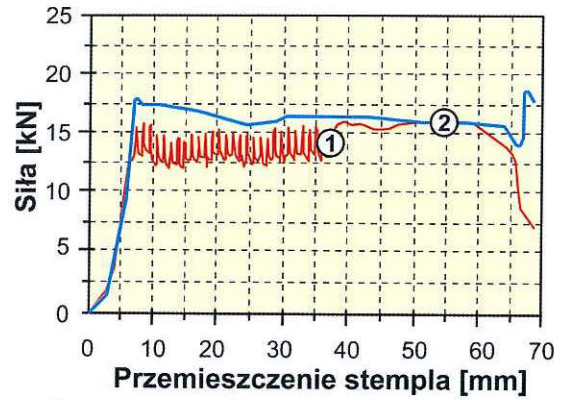
Metodę KOBO wykorzystuje się także w procesie monotonicznego wyciskania realizowanego w obecności oscylacyjnych ruchów matrycy (rys. 8) [10]. Zastosowanie ruchomej matrycy przyczynia się do ok. 30% spadku siły wyciskającej w porównaniu z wartościami otrzymywanymi sposobem klasycznym. Ponadto, skala tego efektu jest uzależniona od częstotliwości matrycy i wraz ze wzrostem częstotliwości obserwuje się dalsze obniżenie wartości parametrów procesu [11].



Rys. 8. Schemat metody KOBO stosowanej w procesie wyciskania [10]

Wyniki badań doświadczalnych zamieszczone w pracy [12] również potwierdzają znaczenie deformacji postaciowej w procesie technologicznym. W tym przypadku zastosowanie cykli skrętnych spowodowało 6% obniżenie siły rozciągającej w procesie ciągnięcia.

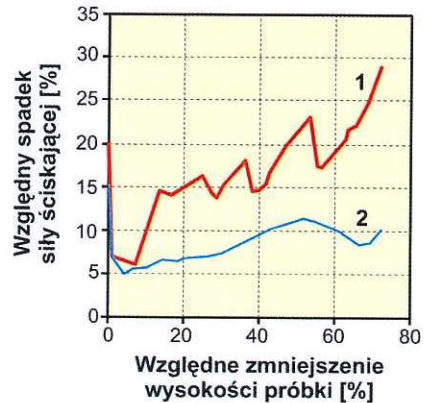
Badania wpływu zmian obciążenia cyklicznego o charakterze skręcającym na proces ściskania oraz wyciskania prowadzili także autorzy pracy [13]. W tym celu zaprojektowany został specjalny przyrząd przeznaczony do mocowania w układzie obciążającym



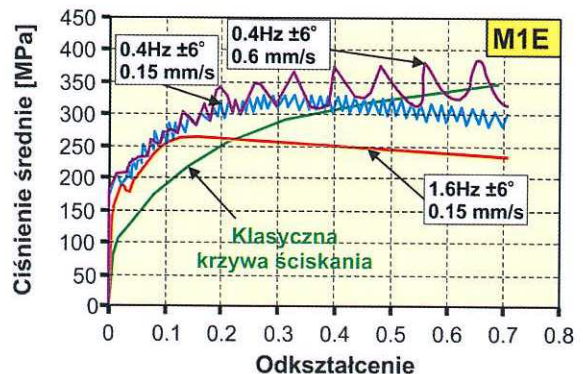
Rys. 9. Ilustracja zmiany siły działającej na stempel w procesie wyciskania z wykorzystaniem metody KOBO; 1 – z udziałem ruchomej matrycy, 2 – w warunkach nieruchomej matrycy [10]

maszyny wytrzymałościowej. Wyniki badań otrzymane z wykorzystaniem zaprojektowanego przyrządu wskazały na wyraźne obniżenie siły ściskającej (rys. 10), wraz ze wzrostem częstotliwości zmian momentu skręcającego.

Ponadto, w pracy [14] przedstawiono wyniki badań uwzględniające wpływ częstotliwości cyklicznego obciążenia rewersyjnie skręcającego na obniżenie ciśnienia w układzie roboczym podczas ściskania miedzi (rys. 11). Łatwo zauważyć, że wzrost częstotliwości cykli skrętnych przyczynia się do dalszego obniżania właściwości mechanicznych materiału na



Rys. 10. Względny spadek siły ściskającej wskutek ruchu wahadłowej płyty dolnej (zamocowanej w szczękach maszyny wytrzymałościowej) dla dwóch wartości prędkości kątowej w rad/s: 0,81(1), 0,215 (2) [13]



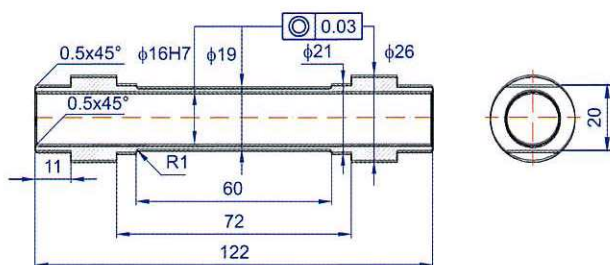
Rys. 11. Wpływ cyklicznego rewersyjnego skręcania na średnią wartość ciśnienia podczas ściskania miedzi M1E [14]

ściskanie. Natomiast niezauważalny jest wpływ wartości częstotliwości, jak i amplitudy cyklicznego obciążenia rewersyjnie skręcającego na ciągliwość materiału. Dla każdego z zastosowanych złożonych programów obciążenia uzyskano ciągliwość materiału równą jej odpowiednikowi z klasycznego testu ściskania.

### Wybrane efekty materiałowe stopu aluminium 2024 w warunkach obciążenia złożonego

Celem badań własnych było określenie wpływu obciążenia cyklicznego na przebieg monotonicznego obciążenia jednocześnie realizowanego w kierunku prostopadłym względem cyklicznego, a w związku z tym identyfikacja zmian właściwości mechanicznych materiału. W odróżnieniu od metody KOBO zastosowano jednak obciążenia cykliczne o znacznie mniejszej amplitudzie odkształcenia (poniżej 1%) wywołanego przez rewersyjne skręcanie.

Badania przeprowadzono w temperaturze pokojowej na cienkościennych, osiowoosymetrycznych próbkach rurkowych o geometrii pokazanej na rys. 12.



Rys. 12. Cienkościenna próbka rurkowa do badania materiałów w złożonym stanie naprężenia

Wykonano je ze stopu aluminium 2024 stosowanego powszechnie w przemyśle lotniczym o składzie chemicznym zamieszczonym w tab. I. Uśrednione wartości podstawowych właściwości mechanicznych stopu określone na podstawie trzech prób jednoosiowego rozciągania przy sterowaniu przemieszczeniem, odkształceniem oraz naprężeniem zamieszczono w tab. II. Badania pierwotnej powierzchni plastyczności [15] wykazały jedynie nieznaczną różnicę w wartościach naprężeń uplastyczniających w kierunku rozciągania oraz ściskania, co wskazuje, że materiał badany praktycznie nie wykazywał obecności naprężeń resztkowych i nie był poddawany dużym deformacjom.

Program badań przewidywał realizację monotonicznej deformacji w obecności obciążenia cyklicz-

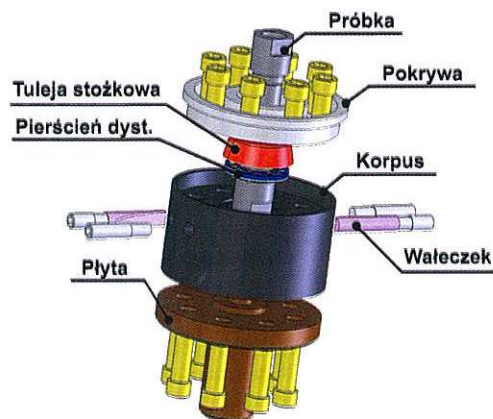
TABELA I. Skład chemiczny stopu aluminium 2024

Al, %	Cu, %	Mg, %	Mn, %	Fe, %	Si, %
92,9	4,35	1,5	0,82	0,42	0,02

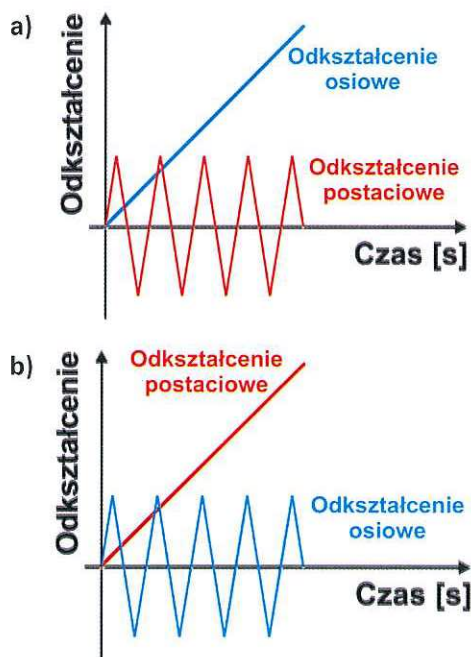
TABELA II. Właściwości mechaniczne stopu aluminium 2024 określone na podstawie badania w jednoosiowym stanie naprężenia wskutek monotonicznego rozciągania wg PN-EN 10002-12004

$E_r$ , MPa	$R_{0,2}$ , MPa	$R_m$ , MPa	$R_{0,1}$ , MPa	$A_{g,r}$ , %	$A_{r,r}$ , %	$Z_r$ , %
$0,74 \times 10^5$	457	584	638	12,08	8,35	10,13

nego w kierunku do niego prostopadłym, przy kombinacji: monotonicznego rozciągania z rewersyjnymi cyklami skrętnymi (rys. 14a) oraz monotonicznego skręcania w obecności symetrycznego rozciągania-ściskania (rys. 14b). W badaniach wykorzystano specjalistyczny uchwyt, którego konstrukcję w widoku rozłożonym zaprezentowano na rys. 13. Badania wykonano dla czterech wartości amplitudy odkształcenia osiowego (postaciowego) – w zależności od realizowanej części programu badawczego, tj.:  $\pm 0,3\%$ ,  $\pm 0,5\%$ ,  $\pm 0,7\%$ ,  $\pm 0,9\%$ . Szersze omówienie wyników przeprowadzonych badań można znaleźć w pracach [3, 15 – 17].

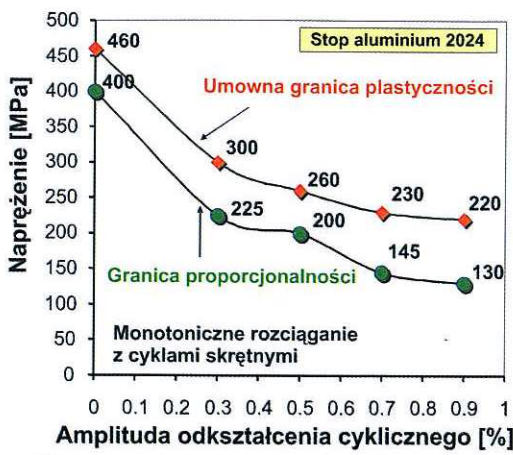


Rys. 13. Widok rozłożonego uchwytu do badania materiałów w dwuwymiarowym stanie naprężenia

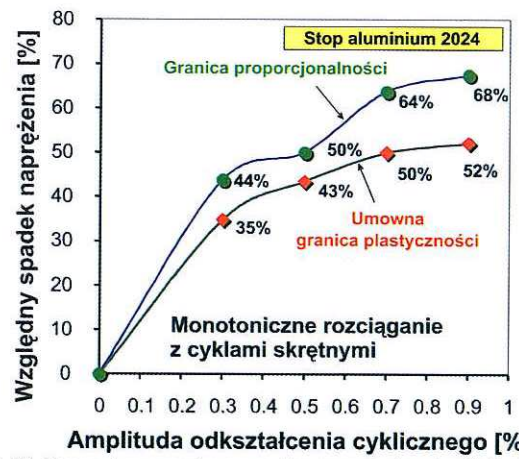


Rys. 14. Programy badawcze sterowane odkształceniem: a) monotoniczne rozciąganie z rewersyjnym skręcaniem, b) monotoniczne skręcanie z cyklami rozciąganie-ściskanie

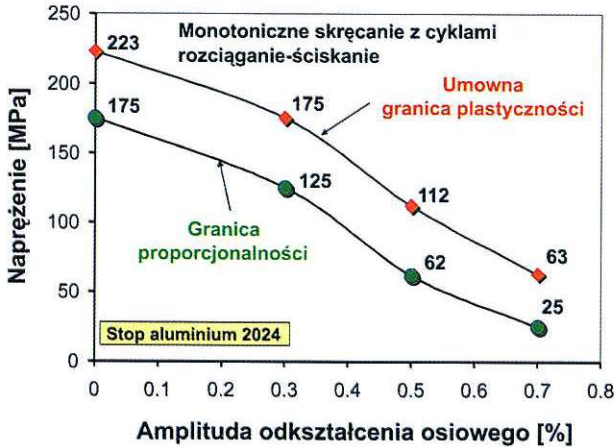
W przypadku obu kombinacji ścieżek obciążenia zaobserwowano, że wraz ze wzrostem amplitudy odkształcenia następuje znaczne obniżenie granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności, (rys. 15, 16). Porównując te dwa wykresy, zauważalny jest także inny charakter zmian analizowanych parametrów mechanicznych badanego materiału.



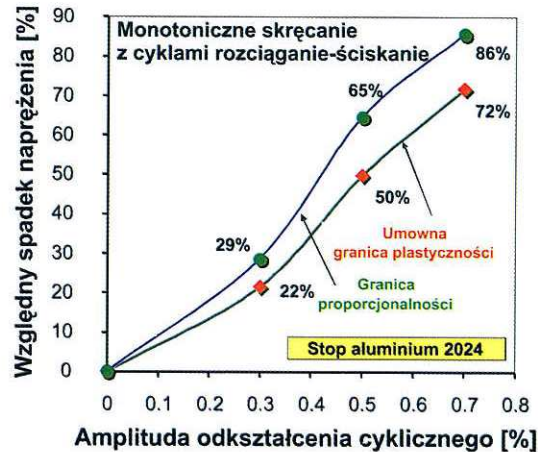
Rys. 15. Zmiana granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności stopu aluminium 2024 podczas monotonicznego rozciągania w obecności cykli skrętnych w zależności od wartości amplitudy odkształcenia postaciowego



Rys. 17. Procentowa zmiana granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności stopu aluminium 2024 podczas monotonicznego rozciągania w obecności cykli rewersyjnie skręcających w zależności od wartości amplitudy odkształcenia postaciowego



Rys. 16. Zmiana granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności stopu aluminium 2024 podczas monotonicznego skręcania w obecności cykli rozciąganie-ściskanie w zależności od wartości amplitudy odkształcenia osiowego

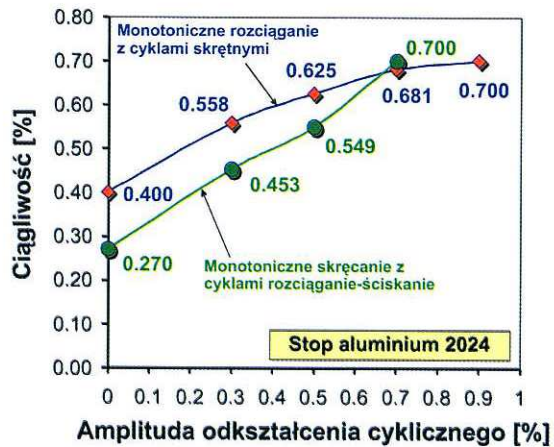


Rys. 18. Procentowa zmiana granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności stopu aluminium 2024 podczas monotonicznego skręcania w obecności cykli rozciąganie-ściskanie w zależności od wartości amplitudy odkształcenia osiowego

W przypadku monotonicznego rozciągania z cyklami skrętnymi obserwuje się asymptotyczne dążenie zarówno umownej granicy plastyczności, jak i granicy proporcjonalności do stałej wartości (rys. 15), czego nie obserwuje się w przypadku monotonicznego skręcania z cyklami rozciąganie-ściskanie (rys. 16).

Efekt znacznego obniżenia granicy proporcjonalności i umownej granicy plastyczności jest szczególnie zauważalny w procentowym zestawieniu ich zmian, obliczanych w odniesieniu do wartości pochodzących z klasycznej próby rozciągania oraz skręcania (rys. 17, 18). Obecność cykli skrętnych o amplitudzie odkształcenia  $\pm 0,9\%$  podczas monotonicznego rozciągania powoduje ok. 70% spadek granicy proporcjonalności, zaś monotoniczne skręcanie realizowane w obecności cykli rozciąganie-ściskanie dla tej samej wartości amplitudy odkształcenia wykazuje ok. 90% obniżenie granicy proporcjonalności.

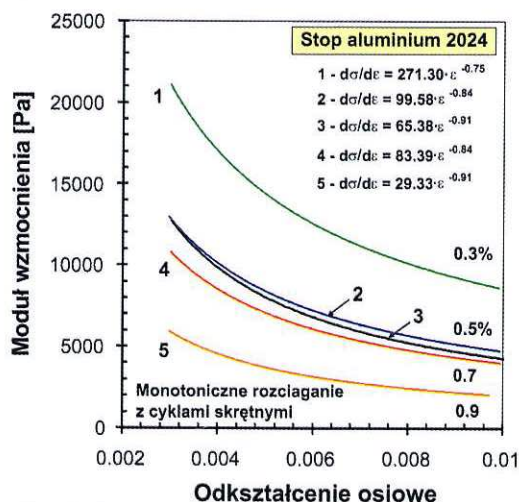
Zmianie ulega również ciągliwość materiału (rys. 19). W przypadku obu kombinacji obciążeń wzrost amplitudy odkształcenia cyklicznego prowadzi do wzrostu ciągliwości w kierunku monotonicznej deformacji. Podobnie jak w przypadku granic



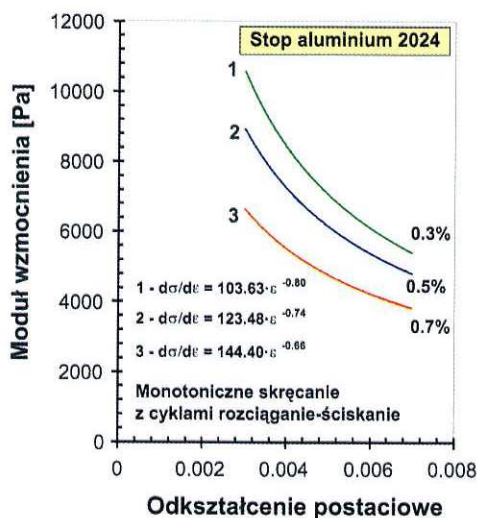
Rys. 19. Zmiana ciągliwości materiału w zależności od wartości amplitudy odkształcenia cyklicznego dla dwóch kombinacji obciążenia o charakterze monotoniczno-cyklicznym

proporcjonalności i plastyczności, ciągliwość materiału dąży asymptotycznie do stałej wartości podczas monotonicznego rozciągania z cyklami skrętnymi. Dla monotonicznego skręcania z cyklami rozciąganie-ściskanie efekt ten nie jest obserwowany.

Ponadto, zauważalne są zmiany stycznego modułu wzmocnienia (rys. 20, 21). W przypadku rozciągania z cyklami skrętnymi moduł wzmocnienia dąży asymptotycznie do stałej wartości (rys. 20 – krzywa nr 5).



Rys. 20. Zmiana stycznego modułu wzmocnienia podczas monotonicznego rozciągania w obecności cykli skrętnych dla czterech wartości amplitudy odkształcenia postaciowego: 0,3% (1), 0,5% (2), 0,7% (4), 0,9% (5); krzywa oznaczona jako 3 pochodzi z klasycznego testu rozciągania



Rys. 21. Zmiana stycznego modułu wzmocnienia podczas monotonicznego skręcania w obecności cykli rozciąganie-ściskanie dla trzech wartości amplitudy odkształcenia osiowego: 0,3% (1), 0,5% (2), 0,7% (3)

## Podsumowanie i wnioski

Obecność obciążenia cyklicznego podczas monotonicznej deformacji powoduje istotne zmiany parametrów mechanicznych materiału. Na uwagę zasługuje wartość deformacji cyklicznej, przy której realizowano badania własne, ponieważ nie przekraczała ona 1%. Odróżnia to zasadniczo doświadczenia do tej pory wykonywane przez inne zespoły badawcze, gdzie stosowano cykliczne obciążenia skręcające wywołujące duże deformacje o wartościach wynoszących nawet 50%.

Efekty będące następstwem obciążenia cyklicznego są widoczne podczas kombinacji monotonicznego rozciągania nałożonego na rewersyjne skręcanie o charakterze cyklicznym, jak i w przypadku mono-

tonicznego skręcania realizowanego w obecności symetrycznych cykli rozciąganie-ściskanie. W obu wymienionych przypadkach obciążenie cykliczne powoduje w kierunku jednocześnie prowadzonej deformacji wskutek obciążenia monotonicznie narastającego spadek granicy proporcjonalności, granicy plastyczności i przyczynia się do wzrostu ciągliwości oraz powoduje obniżenie stycznego modułu wzmocnienia. Należy podkreślić, że wymienione zmiany mają miejsce wyłącznie w trakcie działania obciążenia cyklicznego. W przypadku zatrzymania obciążeń cyklicznych charakterystyka otrzymywana przy obciążeniu monotonicznie narastającym powraca do swojego pierwotnego przebiegu.

Zmiany granicy proporcjonalności oraz granicy plastyczności osiągają około 30% spadek dla wartości amplitudy odkształcenia cyklicznego odpowiadających zakresowi sprężystemu badanego stopu aluminium. Wzrost amplitudy odkształcenia cyklicznego prowadzi do zwiększania efektu obniżenia granicy proporcjonalności oraz plastyczności przy wzroście ciągliwości w kierunku realizowanej monotonicznej deformacji.

Zaobserwowane efekty mogą zostać wykorzystane w celu modyfikacji procesów obróbki plastycznej (np.: ciągnięcie czy wyciskanie), co może istotnie zwiększyć żywotność stosowanych do ich realizacji urządzeń ze względu na obniżenie wartości obciążenia. W aspekcie mechaniki ośrodka ciągłego wspomniane efekty mogą stanowić podstawę do formułowania nowych i rozwijania już stosowanych równań konstytutywnych.

## LITERATURA

1. Kumar A., Samanta S. K., Mallick K.: Study of the effect of deformation on the axes of anisotropy, J. Eng. Mat. Tech., 113, 187 – 191, 1991.
2. Jixi Zhang, Yanyao Jiang: An experimental study of the formation of typical dislocation patterns in polycrystalline copper under cyclic shear. Acta Materialia 55, 1831–1842, 2007.
3. Kowalewski Z., Szymczak T.: An influence of torsional cycles on the uni-axial tension of selected materials. XXII International Congress of Theoretical and Applied Mechanics, ICTAM 2008 Adelaide, Australia, p. 304, 2008.
4. Mnif R., Kchaou M., Elleuch R., Halouani F.: Cyclic Behavior and Damage Analysis of Brass under Cyclic Torsional Loading, J Fail. Anal. and Preven., 450 – 455, 2007.
5. Benallal A., Marquis D.: An experimental investigation of cyclic hardening of 316 stainless steel under complex multiaxial loadings. Trans. 9th SMIRT, 385 – 393, 1987.
6. Tanaka E., Murakami S., Ooka M.: Effects of plastic strain amplitudes on non-proportional cyclic plasticity, Acta Mech., 57, 167 – 182, 1985.
7. Bochniak W., Korbel A., Szyndler R.: Innovative solutions for metal forming. Proc. Inter. Conf. MEFORM 2001 – Herstellung von Rohren und Profilen, Institut für Metallformung Tagungsband, 239, Freiberg/Riesa 2001.
8. Korbel A., Bochniak W.: The structure based design of metal forming operations. J. Mater. Proc. Technology, 53, 229, 1995.
9. Bochniak W., Korbel A., Szyndler R., Hanarz R., Stalony-Dobrzański F., Błaż L., Snarski P.: New forging method of bevel gears from structural steel. J. Mater. Proc. Tech., 173, 75 – 83, 2006.
10. Kong L. X., Hodgson P. D.: Constitutive modelling of extrusion of lead with cyclic torsion. Mater. Sci. Eng., A 276, 32 – 38, 2000.
11. Kong L.X., Hodgson P.D., Wang B.: Development of constitutive models for metal forming with cyclic strain softening. Journal of Materials Processing Technology 89 – 90 44 – 50, 1999.