

METODY WYZNACZANIA RZECZYWISTEJ KRZYWEJ UMOCNIENIA MATERIAŁU

Cz. II. Test wciskania kulistego wgłębnika

Agata ZAJKOWSKA*, Łukasz DERPEŃSKI*, Andrzej SEWERYN*

* Katedra Mechaniki i Informatyki Stosowanej, Wydział Mechaniczny, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45 C, 15-351 Białystok

a.zajkowska@doktoranci.pb.edu.pl, l.derpenski@pb.edu.pl, a.seweryn@pb.edu.pl

Streszczenie: W pracy przedstawiono dwie metody wyznaczania rzeczywistej krzywej umocnienia materiału. W drugiej części pracy opisano drugą z nich, w której wykorzystuje się wyniki testu wciskania kulistego wgłębnika w płaską próbkę z wielokrotnym lokalnym odciążeniem (zależność siły wciskającej wgłębnik od jego zagłębienia w materiał próbki). Na ich podstawie wyznacza się zależność siły od zagłębienia wywołanego odkształceniami plastycznymi. Za pomocą tej zależności i rozwiązania analitycznego wyznacza się parametry krzywej umocnienia badanego materiału. Obie metody wykorzystano do wyznaczenia rzeczywistych krzywych umocnienia stopów aluminium EN-AW 2024 oraz EN-AW 2007. Porównano krzywe umocnienia wyznaczoną za pomocą obu metod i wskazano na duże możliwości zastosowania w praktycznych zagadnieniach inżynierskich.

1. WPROWADZENIE

Twardość jest to umowna miara, która określa cechę ciał stałych, świadcząca o podatności lub odporności na odkształcenia powierzchni, zgniecenie jej lub zarysowanie, pod wpływem zewnętrznego nacisku (działającej siły). Pojęcie twardości materiałów jako pierwszy zdefiniował H. Hertz w 1882 roku, przy czym opierał się on na klasycznej teorii sprężystości, uważając za twardość naprężenia występujące między dwoma dociskanyymi kulami w momencie gdy naprężenie w jednym punkcie osiąga granicę sprężystości. Tak określona twardość była zależna od stałych sprężystości materiału oraz od średnic dociskanych kul (Tabor, 1951).

Metody badania twardości dzielimy ze względu na zastosowanie i zasadę odczytu.

Ze względu na metodę odczytu możemy wyróżnić 3 podstawowe grupy:

- odczyt bezpośredni głębokości wejścia wgłębnika;
- odczyt wielkości odcisku;
- odczyt poprzez konwersję z innej właściwości fizycznej. Możemy również wyróżnić dwie grupy metod pomiaru:
- statyczne metody pomiaru twardości, w których odczytuje się twardość poprzez obliczenia z wielkości odcisku (przy czym odcisk musi zachowywać pewną trwałość);
- dynamiczne metody pomiaru twardości, w których odczytuje się twardość z głębokości wejścia wgłębnika (odczyt poprzez konwersję z innej właściwości fizycznej).

W ostatnich latach szczególnie rozwinęły się metody, które oprócz wyznaczenia samej twardości, dały możliwość wyznaczenia także innych wybranych parametrów materiałowych.

Jedną z głównych metod identyfikacji właściwości materiału jest metoda Brinella. Twardość Brinella zależy od siły obciążającej, dlatego możemy otrzymać zależność siła

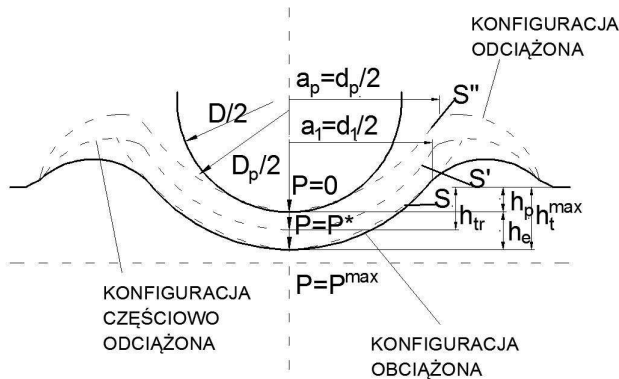
– twardość lub siła – zagłębienie (obciążając kulę różnymi siłami). Uzyskujemy więc więcej informacji o właściwościach badanego materiału, niż przy badaniu za pomocą ostrych wgłębników, takich jak stożek bądź ostrosłup. Przy badaniu twardości za pomocą stożka bądź ostrosłupa otrzymujemy tylko jedną liczbę - wartość twardości. Zatem badając materiał za pomocą klasycznej metody Vickersa możemy zidentyfikować co najwyżej jeden parametr materiałowy. Aby zidentyfikować większą liczbę parametrów konieczny jest pomiar krzywej siła – zagłębienie.

2. WYZNACZANIE RZECZYWISTEJ KRZYWEJ UMOCNIENIA MATERIAŁU W TEŚCIE WCISKANIA KULISTEGO WGLEBNIKA

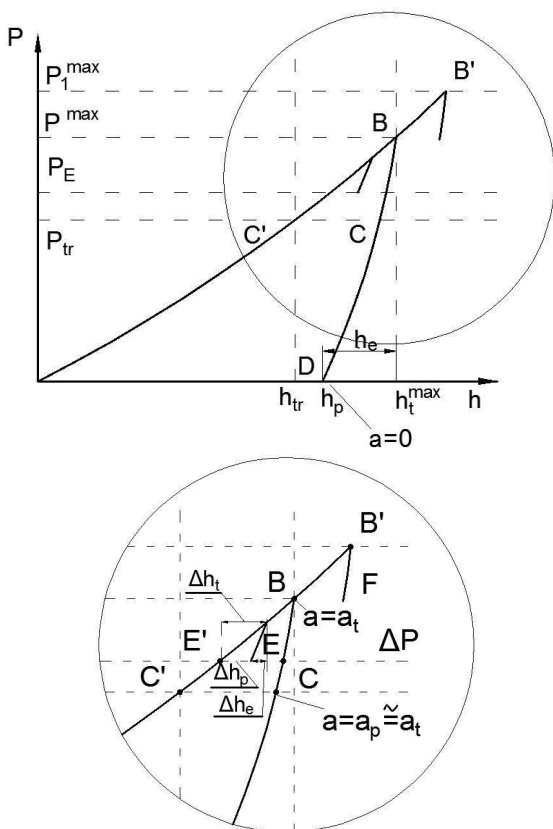
Badanie wciskania kulistego wgłębnika na maszynie wytrzymałościowej polega na obciążeniu, a następnie odciążeniu próbki, dzięki czemu otrzymujemy zależność siła – zagłębienie (Mroziński, 2008). Podczas procesu obciążania pod kulą powstają odkształcenia sprężyste i plastyczne. Czasza kulista, która wówczas powstaje, ma zbliżony promień, do promienia kulki. Jeżeli założymy, że kulka jest sztywne, promień kulistej czaszy jest równy promieniowi kulki. Promień a_t brzegu kontaktu rośnie aż do wartości maksymalnej $a_t = a_t^{\max}$, dla maksymalnej siły $P = P^{\max}$ oraz maksymalnego zagłębienia h_t^{\max} . Możemy wówczas zaobserwować wypływkę na brzegu materiału. Kontur brzegu kontaktu przy maksymalnym obciążeniu oznaczono na Rys. 1 jako S . Od tego momentu ma miejsce proces odciążania. Wraz z przemieszczeniem kuli, przemieszcza się brzeg kontaktu.

Przyrosty przemieszczenia kulki są takie same jak przyrosty brzegu kontaktu. Kontur S przemieszcza się wraz z kulą. Zakończenie tej fazy oznaczono jako punkt C , a kontur S przemieścił się do konturu S' . Na Rys. 2 punktow C odpowiada siła P_{tr} . Gdy siła ta jest mniejsza od P_{tr}

zmieniają się warunki kontaktu. Większym przyrostom przemieszczenia kulki odpowiadają mniejsze przyrosty przemieszczenia brzegu kontaktu. Kula traci kontakt z konturem S' , a promień kontaktu gwałtownie maleje. Faza ta kończy się, gdy siła osiągnie wartość $P = 0$ (a tym samym promień brzegu kontaktu jest równy 0). Kontur brzegu kontaktu po odciążeniu oznaczono na rys. jako S'' .



Rys. 1. Konfiguracje powstałe w czasie testu wciskania wgłębnika



Rys. 2. Zależność siła-zagłębienie dla testu wciskania wgłębnika

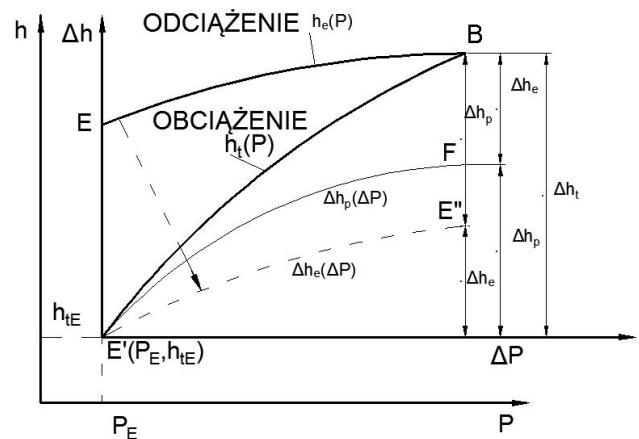
Podsumowując, etapy procesu wciskania wgłębnika możemy podzielić na (Kucharski, 2002):

- zestknięcie się kulki z powierzchnią materiału: $P = 0$, $h_t = 0$, $a_t = 0$;
- obciążanie - siła zmienia się od $P = 0$ do P^{\max} , zagłębienie zmienia się od $h_t = 0$ do h_t^{\max} , promień a_t brzegu kontaktu rośnie od $a_t = 0$ do a_t^{\max} .

- odciążanie - siła zmienia się od P^{\max} do $P = 0$, zagłębienie zmienia się od h_t^{\max} do h_t , promień a_t brzegu kontaktu maleje od a_t^{\max} do $a_t = 0$.

Na krzywej OB (faza obciążania), (Rys. 1), zaznaczono punkt C' odpowiadający sile P_{tr} . Zagłębienie i promień kontaktu dla tej siły oznaczamy jako h_{tr} i a_{tr} . Proces obciążania i odciążania na odcinkach OC' i CD nie może być ze sobą porównywany. Są to dwie inne konfiguracje materiału. Można jednak znaleźć konfiguracje, które są sobie podobne – są to odcinki $C'B$ oraz BC . Na odcinku $C'B$ promień brzegu kontaktu ulega zwiększeniu od a_{tr} do a_t^{\max} , na odcinku BC jest on stały i wynosi a_t^{\max} . Założenie, że $a_{tr} \approx a_t^{\max}$ jest poprawne dla punktów B i C położonych blisko siebie, pozwala porównywać te dwie konfiguracje. Jeśli jednak obrane punkty nie leżą dostatecznie blisko siebie, należy wyznaczyć inny punkt leżący między punktami $C'B$ (punkt E). Na odcinku $C'B$ mamy odkształcenia sprężyste i plastyczne, natomiast na odcinku BC tylko sprężyste odciążenie. Ponieważ konfiguracje $C'B$ oraz BC są podobne, przyjmujemy że dla $P > P_{tr}$ możliwe jest odejmowanie (dodawanie) przyrostów odkształceń w trakcie obciążania do przyrostów w trakcie odciążania.

Zagłębienie h kulki to całka z pola odkształceń. Jeśli odejmiemy przyrosty zagłębienia w czasie odciążania Δh_e (przyrosty sprężyste) od przyrostów zagłębienia w trakcie obciążania Δh_t (przyrosty sprężysto - plastyczne), otrzymamy przyrosty zagłębienia plastycznych Δh_p . Stanowi to istotę opisaną powyżej metody (Kucharski, 2002).

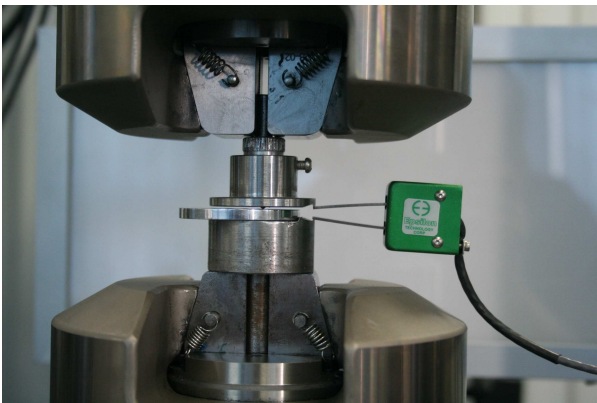


Rys. 3. Tworzenie krzywej zagłębienie plastyczne – siła $h_p(P)$

Na Rys. 3 przemieszczeniu h odpowiada oś rzędnych, a sile P oś odciętych. Równania krzywych $C'B$ i BC można zapisać wówczas jako $h_t = h_t(P)$ (obciążenie) i $h_e = h_e(P)$ (odciążenie). Między punktami C' i B (krzywa obciążania) wprowadzono punkt $E'(h_{tE}, P_E)$, odpowiadający mu punkt na krzywej odciążania to $E(P_{tr} < P_E < P^{\max})$. Na Rys. 3 pokazano fragment krzywej obciążenie – odciążenie EBE' . Umieszczono tam dodatkowy układ współrzędnych zaczepiony w punkcie E' . Oś rzędnych tego układu to Δh , a oś odciętych ΔP . Krzywą BE przesunięto następnie wzdłuż osi rzędnych do punktu E' (krzywa $E'E''$). Krzywe $E'E''$ oraz $E'B$ można przedstawić odpowiednio jako $\Delta h_e(\Delta P)$ i $\Delta h_t(\Delta P)$. Przyrosty zagłębienia plastycznego $\Delta h_p(\Delta P)$

przedstawia krzywa $E'F$, wyznaczona jako różnica funkcji $\Delta h_p(\Delta P) = \Delta h_i(\Delta P) - \Delta h_e(\Delta P)$.

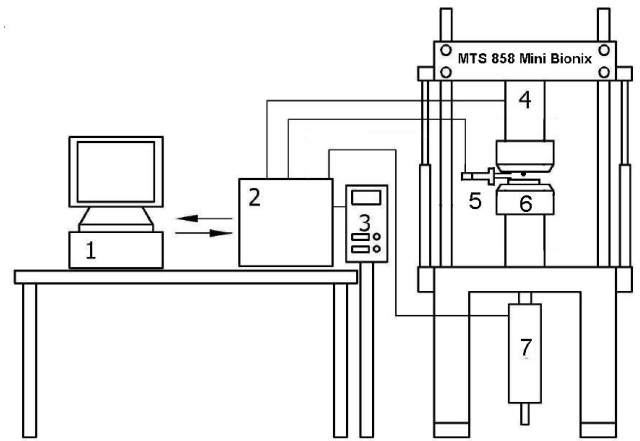
Krzywa, którą otrzymujemy ($\Delta h_p(\Delta P)$), jest tak samo nachylona w każdym punkcie, jak poszukiwana krzywa $h_p(P)$, w przedziale (P_E, P^{max}) , ale ma inny punkt początkowy – na razie nieznan. W celu wyznaczenia krzywej $\Delta h_p(\Delta P)$ w kolejnych przedziałach tzn. (P^{max}, P_1^{max}) , gdy $P_1^{max} > P^{max} = P_B$, należy przeprowadzić eksperyment: obciążanie od punktu E przez punkt B do kolejnego punktu zwrotu obciążenia B' i dalej odciążenie do punktu F . Odejmowanie opisane powyżej przeprowadzamy w tym i w kolejnych przedziałach, otrzymując fragmenty krzywej $h_p(P)$. Wyznaczanie całej krzywej $h_p(P)$ wiąże się z przeprowadzeniem eksperymentu obciążania – częściowego odciążania. Punkty zwrotne z przedziału $(P_e^{max}; P^{max})$ można zapisać jako P_1, P_3, \dots, P_n . P_e^{max} oznacza maksymalną siłę, która wywołuje jedynie odkształcenia sprężyste pod kulką. Jeśli oznaczymy punkty, dla których odciążenie przechodzi w ponowne obciążenie jako P_2, P_4, \dots, P_{n+1} , to przyrosty obciążenia można zapisać jako $\Delta P_i^L = P_i - P_{i-2}$, a odciążenia jako $\Delta P_i^u = P_i - P_{i+1}$, dla którego $\Delta P_i^u = \Delta P_i^L$, a następnie kolejne obciążenie $\Delta P_i^L = \Delta P_i^u$. Zakładamy, że ΔP_i^u jest takim samym ułamkiem wartości P_i dla wszystkich punktów zwrotnych. Wówczas otrzymujemy $\Delta P_i^u = fP_i$ oraz $P_i = (P_{i-2}) / (1-f)$ dla $i=1, 3, 5, \dots, n$. Widzimy, iż wartości P_i , we wszystkich punktach zwrotnych, tworzą ciąg geometryczny (Kucharski, 2002).



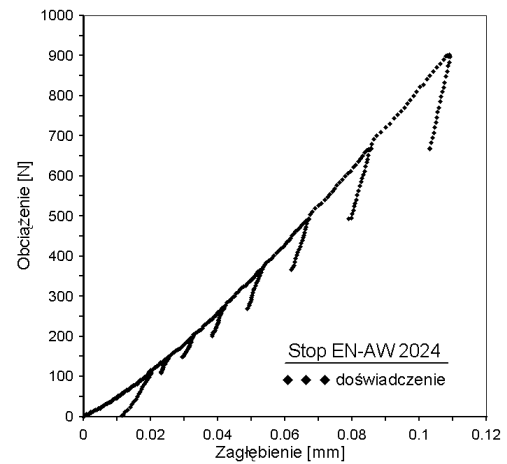
Rys. 4. Wciskanie kulki w płaską próbkę, pomiar zagłębienia za pomocą ekstensometru

Fragmenty krzywej $h_p(P)$ otrzymujemy poprzez odejmowanie fragmentów krzywych obciążania i odciążania. Krzywe te nie łączą się ze sobą, ponieważ ich początkowe punkty położone są na krzywej $h_i(P)$. Aby wyznaczyć krzywą $h_i(P)$ obieramy układ $h_p - P$ z początkiem w punkcie $(h_e^{max}; P_e^{max})$. Do tego punktu przesuwamy wzdłuż osi h_p fragment krzywej $h_p(P)$ z przedziału (P_e^{max}, P_n) , a następnie kolejne fragmenty, w taki sposób, żeby koniec jednego był początkiem następnego.

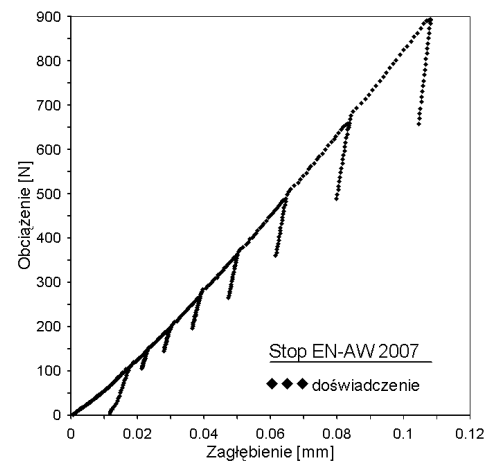
Próbie wciskania wgłębnika przeprowadzono na podstawie normy PN-EN ISO 6506-1. Dobrana została średnica kulki wynosząca $D = 2,5$ mm oraz obciążenie nominalne: 919,5 N. Wykonano okrągłe płaskie próbki grubości 5 mm i średnicy 40 mm. Powierzchnia, na której miały być wykonane testy wciskania wypolerowano ręcznie co zapobiegło ewentualnemu umocnieniu warstwy wierzchniej.



Rys. 5. Schemat stanowiska badawczego: 1 – komputer z oprogramowaniem użytkowym MTS, 2 – sterownik cyfrowy maszyny wytrzymałościowej MTS 858 Mini Bionix, 3 – pulpit sterowniczy, 4 – ruchoma głowica maszyny, 5 – ekstensometr osiowy Epsilon 3541-005M-025-ST, 6 – ruchoma głowica maszyny, 7 – serwowzawór z czujnikiem pomiaru przemieszczenia



Rys. 6. Eksperymentalna zależność obciążenie – zagłębienie dla stopu aluminium EN-AW 2024



Rys. 7. Eksperymentalna zależność obciążenie – zagłębienie dla stopu aluminium EN-AW 2007

Dobre zostały kolejne przyrosty obciążenia, aż do jego wartości nominalnej. Przyjęto $\Delta P_i = 0,26P_i$, $i = 1, \dots, 8$.

Otrzymano w ten sposób ciąg obciążeń i odciążeń: $P_1, P_2, P_3, P_4, \dots$, a mianowicie: $P_1=111,7, P_2=150,9, P_3=204, \dots, P_7=680,4, P_8=919,5$ N (Rys. 6 i 7).

Następnie przeprowadzono eksperyment, otrzymując zależność $P - h$ (siła – zagłębienie).

Próbka zastała umieszczona na sztywnej podstawie umocowanej w szczękach mechanicznych maszyny wytrzymałościowej MTS 858 Mini Bionix. Kulisty wgłębnik zamocowano w stemplu. Przemieszczenie wgłębnika było rejestrowane za pomocą ekstensometru osiowego Epsilon 3541-005M-025-ST o bazie pomiarowej 5 mm i zakresie $+2,5$ mm / -1 mm (Rys. 4). Schemat stanowiska badawczego przedstawiono na Rys. 5.

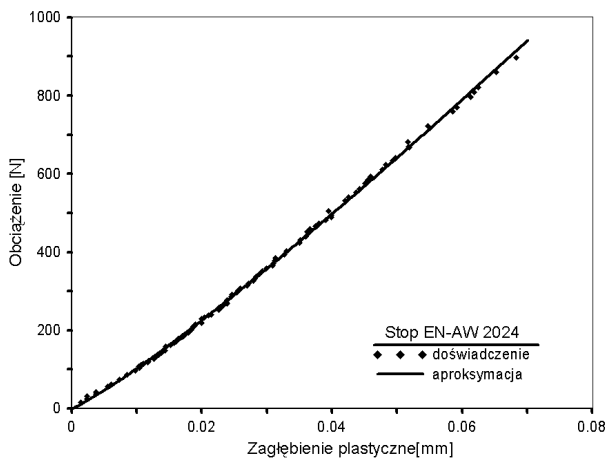
$$P = \pi \alpha k \beta^m c^{2+m} D^2 \left(\frac{h_p}{D} \right)^{m+1} \quad (1)$$

gdzie współczynniki: $\alpha = 2,8$ oraz $\beta = 0,4$ przyjęto dla materiału nieliniowo sprężystego (Hill i inni, 1989; Kucharski, 2002), $c^2 = 2,5((2n - 2)/(4n + 1))$ - niezmiennik procesu zagłębiania kulki w określony materiał, $n = 8$ - liczba punktów zwrotnych, D - średnica kulki, k oraz m - szukane parametry materiałowe.

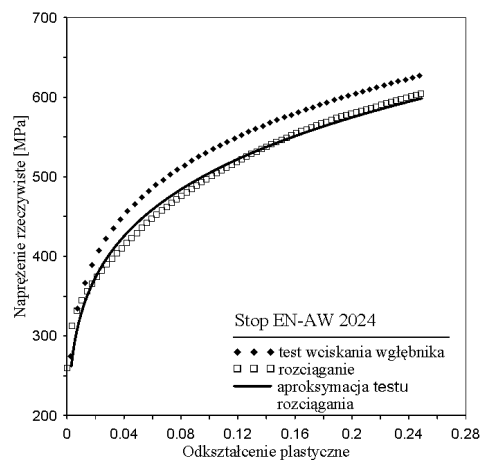
Na ich podstawie wygenerowano krzywą umocnienia badanego materiału w postaci:

$$\sigma = k \varepsilon_p^m, \quad (2)$$

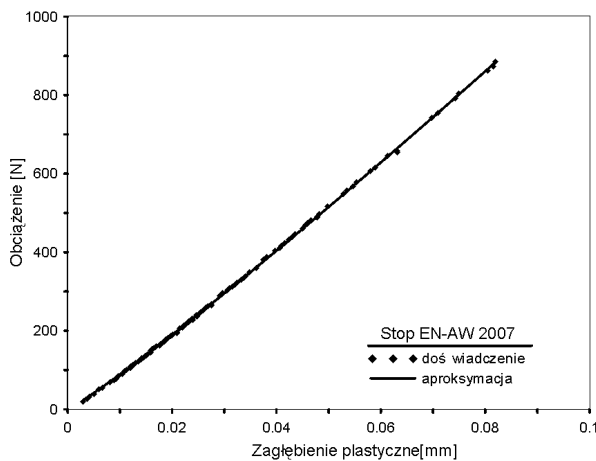
gdzie: σ - naprężenie normalne (osiowe), ε_p - osiowe odkształcenie plastyczne.



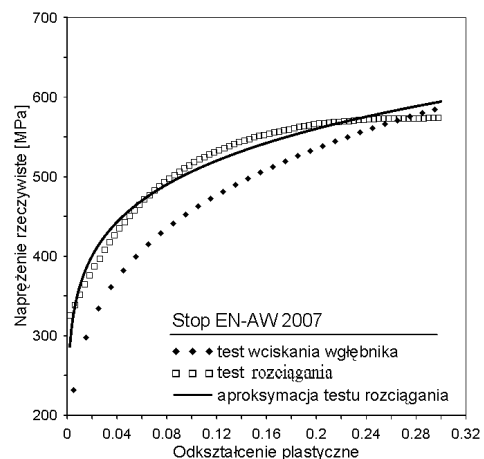
Rys. 8. Doświadczalna krzywa $P(h_p)$ dla stopu EN-AW 2024



Rys. 10. Porównanie rzeczywistych krzywych umocnienia otrzymanych z wykresu rozciągania próbki oraz wciskania kulistego wgłębnika dla stopu aluminium EN-AW 2024



Rys. 9. Doświadczalna krzywa $P(h_p)$ dla stopu EN-AW 2007



Rys. 11. Porównanie rzeczywistych krzywych umocnienia otrzymanych z wykresu rozciągania próbki oraz wciskania kulistego wgłębnika dla stopu aluminium EN-AW 2007

Dane otrzymane z eksperymentu (zależność siły od zagłębienia) poddano obróbce zgodnie z uprzednio opisaną procedurą. Sporządzono wykres $P - h_p$ (siła – zagłębienie plastyczne). Krzywą siła – plastyczne zagłębienie $P(h_p)$ aproksymowano krzywą potęgową (Rys. 8 i 9). Otrzymano przybliżoną postać funkcji: $P = 16238 h_p^{1,089}$ dla stopu aluminium EN-AW 2024 oraz $P = 14606 h_p^{1,113}$ dla stopu aluminium EN-AW 2007.

Kolejnym etapem było wyznaczenie stałych materiałowych, metodą regresji liniowej, z zależności:

Do opisu właściwości badanego materiału można użyć większej ilości parametrów niż w powyższej zależności. W literaturze można znaleźć również opis krzywej umoc-

nienia materiału za pomocą trzech parametrów (Kucharski, Mróz, 2004).

Na podstawie zależności (1) wyznaczono wartości współczynników: dla stopu aluminium EN-AW 2024: $k = 805,7$ oraz $m = 0,1798$ oraz dla stopu aluminium EN-AW 2007: $k = 771$ oraz $m = 0,226$.

Tab. 1. Porównanie wartości współczynników badanych stopów aluminium

Materiał	k	m	k_1	m_1
EN-AW 2007	771	0,226	709,7	0,146
EN-AW 2024	805,7	0,1798	759,7	0,1749

Weryfikacji powyższej metody dokonano porównując krzywą umocnienia materiału wyznaczoną z wykresu siła – plastyczne zagłębienie, z krzywą uzyskaną metodą hybrydową z wykorzystaniem testu rozciągania próbki, przedstawioną w pierwszej części pracy. Krzywe wyznaczone obie metodami zamieszczono na Rys. 10 i 11.

Także krzywą umocnienia (naprężenie rzeczywiste – odkształcenie plastyczne) otrzymaną za pomocą testu rozciągania aproksymowano funkcją potęgową. Otrzymano wartości współczynników: dla stopu aluminium EN-AW 2024: $k_1 = 759,7$ oraz $m_1 = 0,1749$, zbliżone do tych otrzymanych za pomocą metody wciskania kulistego wgłębnika, oraz dla stopu aluminium EN-AW 2007: $k_1 = 709,7$ oraz $m_1 = 0,146$. Jak więc można zauważyć, w przypadku stopu aluminium EN-AW 2007 otrzymane wyniki były mniej dokładne (Rys. 11).

3. WNIOSKI

W pracy zaprezentowano dwie metody wyznaczania rzeczywistej krzywej umocnienia materiału. Pierwsza z nich wykorzystuje krzywą rozciągania próbki wykonanej z danego materiału oraz wielokrotne obliczenia za pomocą metody elementów skończonych (z uwzględnieniem modelu ciała sprężysto – plastycznego ze wzmocnieniem oraz nieliniowości geometrycznej). Metoda ta pozwala na dokładne wyznaczenie krzywej umocnienia, jej wadą jest konieczność przygotowania próbek lub minipróbek (o bardzo małym wymiarze i bazie pomiarowej) w przypadku materiału niejednorodnego. Nie ma zatem w tym przypadku możliwości analizy zmian parametrów umocnienia materiału elementu konstrukcyjnego podczas obciążeń zmęczeniowych i określenia na tej podstawie stanu uszkodzenia.

Druga z metod, polegająca na analizie procesu wciskania kulistego wgłębnika, jest mniej dokładna od poprzedniej, ale pozwala na wyznaczanie parametrów umocnienia materiału w różnych punktach materiału elementu konstrukcyjnego (badania lokalne) bez konieczności przygotowywania specjalnych próbek. Umożliwia ona także analizę zmian właściwości plastycznych materiału podczas procesu zmęczenia i wykorzystanie tego do prognozowania stanu uszkodzenia.

LITERATURA

1. Hill R., Storakers F. R. S. B., Zdonek A. B. (1989), A theoretical study of the Brinell hardness test, *Proc. R. Soc. Lond. A* 423, 301-330.
2. Kucharski S. (2002), *Identyfikacja własności i ewolucja stanu technologicznej warstwy wierzchniej elementów obciążonych monotonicznie i cyklicznie*, Warszawa, IPPT PAN.
3. Kucharski S., Mróz Z. (2004) *Identification of material parameters by means of compliance moduli In spherical indentation test*, Materials Science and Engineering A 379 448-456
4. Mroziński S. (2008), *Stabilizacja własności cyklicznych metali i jej wpływ na trwałość zmęczeniową*, Wydawnictwo UTP w Bydgoszczy.
5. PN-EN ISO 14577-1 (2005), *Metale – Instrumentalna próba wciskania wgłębnika do określania twardości i innych własności materiałów - Część 1: Metoda badania, PKN*
6. PN-EN ISO 6506-1 (2008), *Metale – Pomiar twardości sposobem Brinella – Część 1: Metoda badań, PKN*
7. Tabor D. (1951), *The Hardness of Metals*, Clarendon Press, Oxford.

METHODS OF DETERMINATION OF REAL HARDENING CURVE

Abstract: The paper is devoted to real hardening curve determination. Two methods are used in this paper. In this part based on spherical cyclical indentation test. The values of force and translocation measured during an experiment were used to determine the force-hollow curve and afterwards the force-plastic hollow curve. Basing on the force-plastic hollow relation, the material hardening curve was generated. Experiments were performed on aluminum alloy EN-AW 2024 and EN-AW 2007.