

METODY WYZNACZANIA RZECZYWISTEJ KRZYWEJ UMOCNIENIA MATERIAŁU

Cz. I. Test rozciągania próbki

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 części pierwszej pracy opisano pierwszą z nich, w której wykorzystuje się wyniki testu rozciągania próbki gładkiej (zależność siły rozciągającej od przemieszczenia) oraz wielokrotne obliczenia numeryczne za pomocą metody elementów skończonych z uwzględnieniem sprężysto-plastycznego modelu materiału z nieznanym a priori umocnieniem. Dzięki temu uwzględnia się bardzo ważny efekt niejednorodności pól naprężeń i odkształceń wywołanych tworzeniem się szyjki.

1. WPROWADZENIE

Krzywa umocnienia opisuje zachowanie materiału w zakresie odkształceń plastycznych w teście jednoosiowego rozciągania (lub ściskania). Na stany wieloosiowe (szczególnie w przypadku obciążeń nieproporcjonalnych) może być ona rozszerzona za pomocą odpowiedniego modelu matematycznego, np. wielopowierzchniowego modelu umocnienia materiału (Mróz, 1967; Garud, 1981).

Znajomość rzeczywistych krzywych umocnienia materiałów ma duże znaczenie praktyczne, pozwala np. na ustalenie parametrów obróbki plastycznej oraz właściwości kształtowanych elementów. Szczególnie ważne jest dokładne wyznaczenie rzeczywistej krzywej umocnienia w przypadku zastosowania jej w obliczeniach numerycznych pól naprężeń i odkształceń (np. za pomocą metody elementów skończonych), a także podczas wyznaczania trwałości zmęczeniowej elementów konstrukcyjnych w zakresie obciążeń niskocyklowych.

Krzywą umocnienia materiału można wyznaczyć z określonej w normie PN-EN 10002-1:2002 próby monotonicznego rozciągania gładkich próbek wykonanych z tego materiału. W czasie eksperymentu mierzona jest siła rozciągająca $F(t)$ oraz chwilowa długość roboczej części (bazy pomiarowej) próbki $u = l(t)$. Wielkości te pozwalają na wyznaczenie stanu naprężenia oraz odkształcenia w próbce. Krzywa umocnienia może przedstawiać zależności pomiędzy:

a) inżynierskim naprężeniem uplastyczniającym s_{11} a inżynierskim odkształceniem e_{11} , obliczonych z zależności:

$$s_{11}(t) = \frac{F(t)}{S_0}, \quad (1)$$

$$e_{11}(t) = \frac{l(t) - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l(t)}{l_0} \quad (2)$$

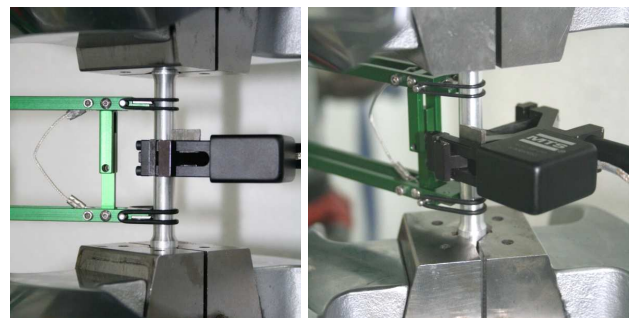
gdzie: S_0 – pole przekroju pierwotnego próbki (jej części pomiarowej), l_0 – początkowa długość części roboczej (bazy pomiarowej) próbki, t – czas;

b) rzeczywistym naprężeniem powodującym uplastycznienie materiału a rzeczywistym odkształceniem:

$$\sigma_{11} = \frac{F(t)}{S(t)}, \quad (3)$$

$$\varepsilon_{11} = \ln \frac{l(t)}{l_0} = \ln \left[\frac{l_0 + \Delta l(t)}{l_0} \right], \quad (4)$$

gdzie: $S(t)$ – chwilowe pole przekroju poprzecznego części pomiarowej próbki.



Rys. 1. Próбка gładka z ekstensometrami

W obu przedstawionych powyżej metodach nie uwzględnia się niejednorodności rozkładu naprężeń i odkształceń w przekroju poprzecznym próbki wywołanej jej „szykowaniem” (co daje efekt podobny do działania karbu). Ponadto w pierwszym podejściu nie uwzględnia się zmiany przekroju poprzecznego próbki w zakresie pomiarowym, co wiąże się z dużymi błędami. Jest to zatem najmniej dokładna metoda.

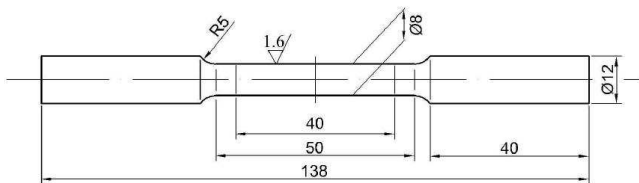
W niniejszej pracy rzeczywiste krzywe umocnienia materiału do momentu powstania „szyjki” wyznaczone na podstawie zależności (3) – (4). Wyznaczenie krzywych wzmocnienia w tym przedziale było możliwe dzięki zastosowaniu dwóch ekstensometrów, mierzących zmianę długości bazy pomiarowej i średnicy osiowoosymetrycznej próbki podczas rozciągania (Rys. 1). Pozostały zakres

krzywych wzmocnienia wyznaczono za pomocą wielokrotnie powtarzanych obliczeń numerycznych z uwzględnieniem efektu powstawania szyjki, aż do momentu, gdy kształt krzywej siła – przemieszczenie ($F - u$) otrzymany z obliczeń numerycznych był bliski krzywej siła - przemieszczenie uzyskanej z badań doświadczalnych (Zienkiewicz, 2000).

Druga z przedstawionych w pracy metod wykorzystuje krzywą zagłębienie kulistego wgłębnika (wraz z odcinkami opisującymi lokalne odciążenie) wciskanego zadaną siłą. Pozwala to na wyznaczenie zależności siła – zagłębienie plastyczne. Na jej podstawie obliczono rzeczywistą krzywą umocnienia materiału (Kucharski, 2002).

2. WYZNACZANIE RZECZYWISTEJ KRZYWEJ UMOCNIENIA MATERIAŁU W TEŚCIE MONOTONICZNEGO ROZCIĄGANIA

Do wyznaczenia krzywych rozciągania materiałów wykorzystano osiowosymetryczne próbki bez karbu (gładkie) wykonane według wytycznych zamieszczonych w PN-EN 10002-1:2002 – Próba rozciągania (rys. 2).



Rys. 2. Próbkę osiowosymetryczną użytą w teście rozciągania

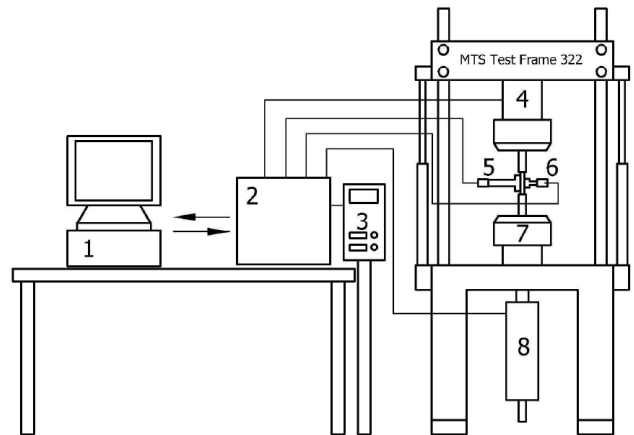
Badania doświadczalne przeprowadzono w temperaturze pokojowej na programowalnej, hydraulicznej, jednoosiowej maszynie wytrzymałościowej typu MTS TestFrame 322, pracującej w pętli sprzężenia zwrotnego, sterowanej za pomocą systemu TestStarII, będącej na wyposażeniu Katedry Mechaniki i Informatyki Stosowanej Wydziału Mechanicznego Politechniki Białostockiej. Zakres obciążenia rozciągającego (ściskającego) zadawanego na maszynie wynosił ± 50 kN.

Na Rys. 3 przedstawiono schemat stanowiska badawczego. Próbkę rozciągano stosując wymuszenie przemieszczeniowe sterowane ekstensometrem osiowym 5 działającym z maszyną wytrzymałościową w pętli sprzężenia zwrotnego. Ten typ sterowania maszyną zapewniał dopasowanie odpowiedzi maszyny do sygnału zadanego na ekstensometrze.

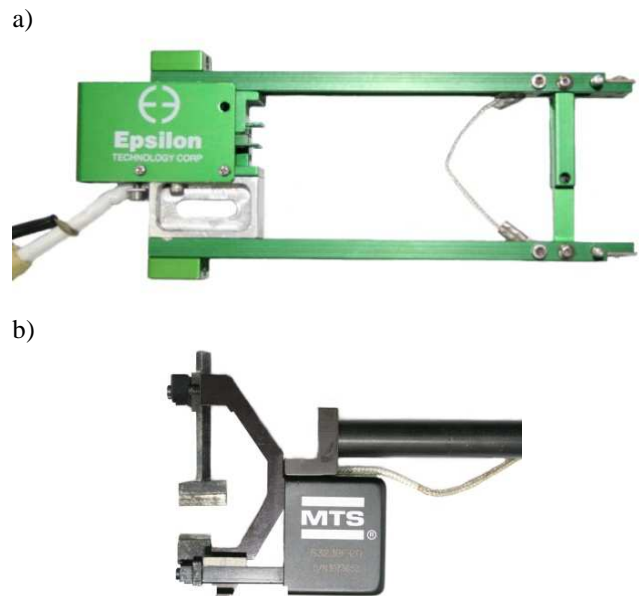
Przemieszczenia odcinka pomiarowego wyznaczono za pomocą osiowego ekstensometru firmy Epsilon 3542-050M-025-HT1 (rys. 4.a) o bazie pomiarowej 40 mm i zakresie pomiaru ± 12.5 mm. Dla badanych stopów aluminium zastosowano prędkość przemieszczenia bazy pomiarowej $\Delta \dot{l} = 0.1$ mm/s, co odpowiada prędkości odkształcenia równej $\dot{\epsilon} = 0.0025$ 1/s zgodnie z PN-EN 10002-1.

W przeprowadzonych badaniach doświadczalnych zarejestrowano zależności siły rozciągającej od wydłużenia bazy pomiarowej ekstensometru (rys. 5) dla obu materia-

łów. Za pomocą ekstensometru średnicowego odczytano zmianę średnicy przekroju poprzecznego badanych próbek do momentu pojawienia się przewężenia („szyjki”).

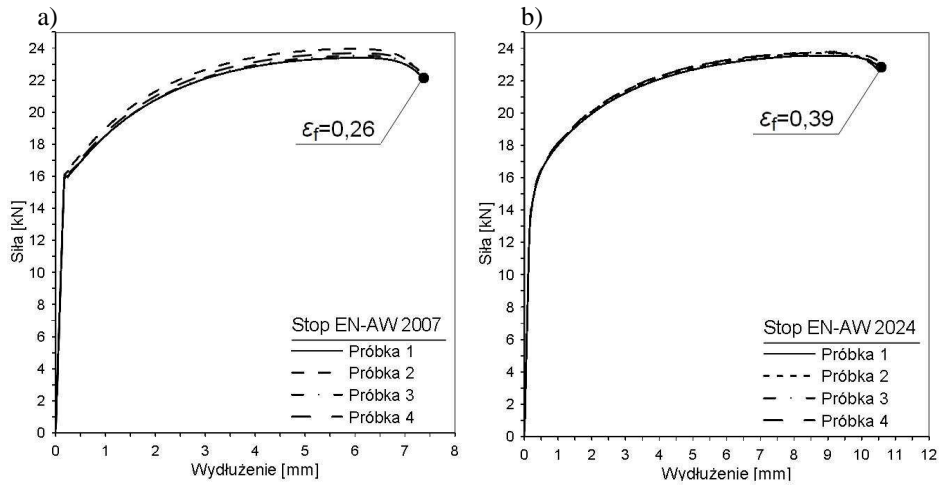


Rys. 3. Schemat stanowiska badawczego: 1 – komputer z oprogramowaniem użytkowym MTS, 2 – sterownik cyfrowy TestStarII maszyny wytrzymałościowej MTS Test Frame 322, 3 – pulpit sterowniczy, 4 – dynamometr, 5 – ekstensometr osiowy Epsilon 3542-050M-025-HT1, 6 – ekstensometr średnicowy MTS 632.18F-20, 7 – ruchoma głowica maszyny, 8 – serwowzawór z czujnikiem pomiaru przemieszczenia

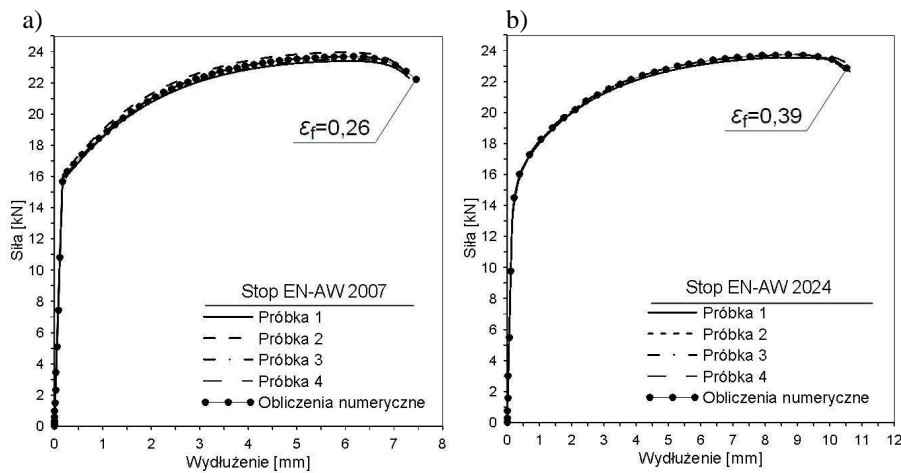


Rys. 4. Ekstensometry: (a) osiowy Epsilon 3542-050M-025-HT1, (b) średnicowy MTS 632.18F-20

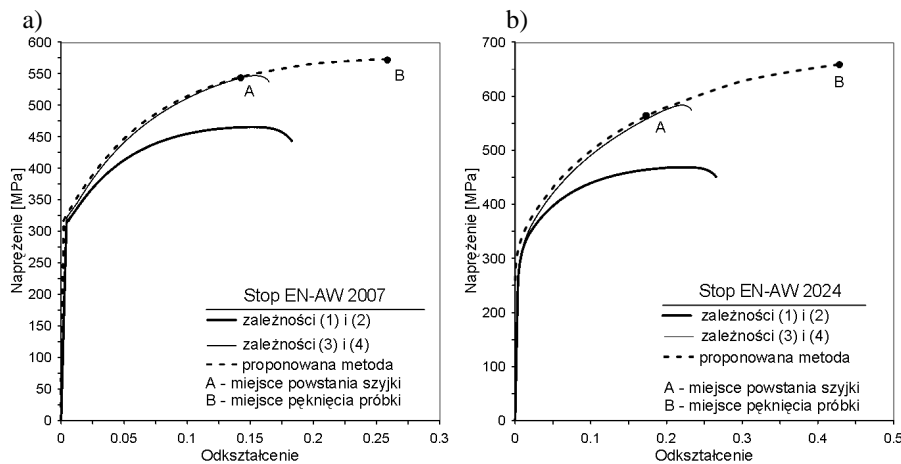
W doświadczeniu zastosowano także ekstensometr średnicowy MTS 632.18F-20 (rys. 4.b) o bazie pomiarowej równej średnicy badanej próbki i zakresie pomiaru ± 1 mm. Pozwoliło to na pomiar zmiany średnicy podczas obciążania próbki, aż do momentu pojawienia się przewężenia, zwanego „szyjką”. Dla wszystkich próbek pęknięcie występowało zawsze w obszarze ograniczonym bazą pomiarową osiowego ekstensometru. Wykonano cztery próby rozciągania dla każdego materiału.



Rys. 5. Wykres siła – wydłużenie bazy pomiarowej dla stopów aluminium: EN-AW 2007 (a) i EN-AW 2024 (b)



Rys. 6. Zależności siły od przemieszczenia otrzymane z badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych: a) stop aluminium EN-AW 2007, b) stop aluminium EN-AW 2024



Rys. 7. Zależność naprężenia od odkształcenia: a) stop aluminium EN-AW 2007, b) stop aluminium EN-AW 2024

Tab. 1. Zestawienie parametrów wytrzymałościowych otrzymanych z próby monotonicznego rozciągania

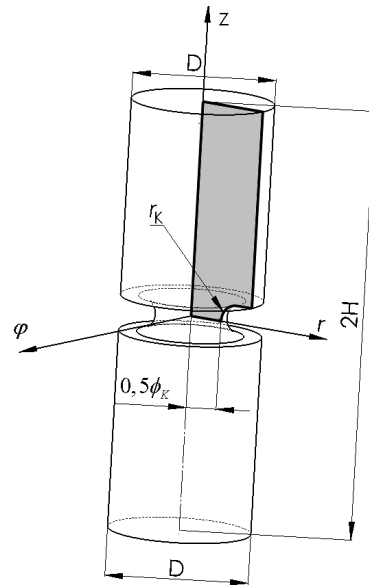
Materiał	d_0 [mm]	d_f [mm]	ϵ_f [%]	F_H [kN]	F_{max} [kN]	A_5 [%]	Z [%]
EN-AW 2024	8.00	6.52	39	13.07	23.69	26.25	18.50
EN-AW 2007	8.00	7.03	26	15.91	23.65	18.19	12.16

W Tab. 1 przedstawiono parametry wytrzymałościowe badanych materiałów, otrzymane z próby monotonicznego rozciągania (F_H – maksymalna siła rozciągająca w zakresie sprężystym, F_u – maksymalna siła rozciągająca, A_5 – wydłużenie po rozerwaniu, Z – przewężenie przekroju). Wyniki otrzymano uśredniając wartości dla czterech powtórzeń.

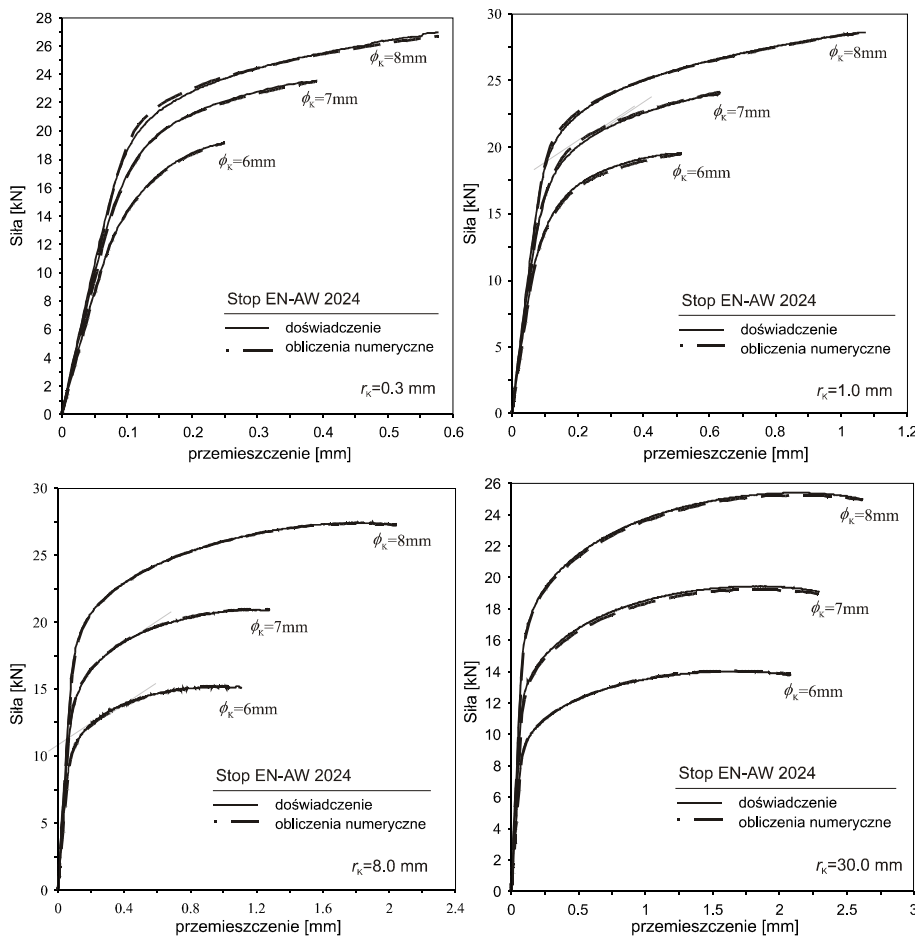
Obliczenia numeryczne pól naprężeń i odkształceń w próbkach gładkich wykonanych ze stopu aluminium EN-

AW 2024 oraz EN-AW 2007 określono za pomocą programu MSC.MARC bazującego na metodzie elementów skończonych. W obliczeniach uwzględniono ośiową symetrię próbki oraz symetrię karbu. Zastosowano czterowęzłowe izoparametryczne elementy skończone przeznaczone do analizy zagadnień osiowosymetrycznych. Uwzględniono nieliniowość geometryczną i materiałową. Do opisu zależności pomiędzy naprężeniem a odkształceniem osiowym w badanych próbkach w zakresie plastycznym (po przekroczeniu granicy plastyczności $R_{0,2}$), wykorzystano sprężysto-plastyczny model materiału, ze wzmocnieniem izotropowym. Przyjęto warunek plastyczności Hubera - von Misesa. Krzywą wzmocnienia materiału aproksymowano linią łamaną (odcinkami prostymi). Kształt rzeczywistej krzywej odkształcenie – naprężenie rzeczywiste do momentu powstawania „szyjki” określono doświadczalnie w sposób bezpośredni za pomocą wzorów (3) i (4). Wyznaczenie krzywych wzmocnienia w tym przedziale było możliwe dzięki zastosowaniu dwóch ekstensometrów, mierzących zmianę długości bazy pomiarowej i średnicy próbki podczas rozciągania. Pozostały zakres krzywych wzmocnienia wyznaczono za pomocą wielokrotnie powtarzanych obliczeń numerycznych z uwzględnieniem efektu powstawania szyjki. Obliczenia wykonuje się dla każdego odcinka krzywej umocnienia, zakładając różne moduły wzmocnienia materiału dla tego odcinka, aż do momentu, gdy kształt krzywej siła-przemieszczenie ($F-u$) otrzymany z obliczeń numerycz-

nych był bliski krzywej siła – przemieszczenie uzyskanej z badań doświadczalnych (Derpeński i Seweryn, 2010).



Rys. 8. Kształt próbki przyjęty do analizy ($D = 10\text{mm}$, $H = 120\text{mm}$)



Rys. 9. Porównanie zależności siły od przemieszczenia otrzymanych z badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych dla próbek o różnym promieniu zaokrąglenia karbu r_k (stop aluminium EN-AW 2024)

Na Rys. 6 przedstawiono porównanie zależności siły od przemieszczenia otrzymanych z badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych dla poszczególnych materiałów, a na Rys. 7 rzeczywiste krzywe wzmocnienia $\sigma - \varepsilon$ w całym zakresie obciążenia dla obu stopów aluminium.

W Tab. 2 zestawiono podstawowe parametry wytrzymałościowe badanych materiałów. W Tab. 3 zestawiono natomiast wartości ε_f – odkształcenia osiowego w momencie pęknięcia.

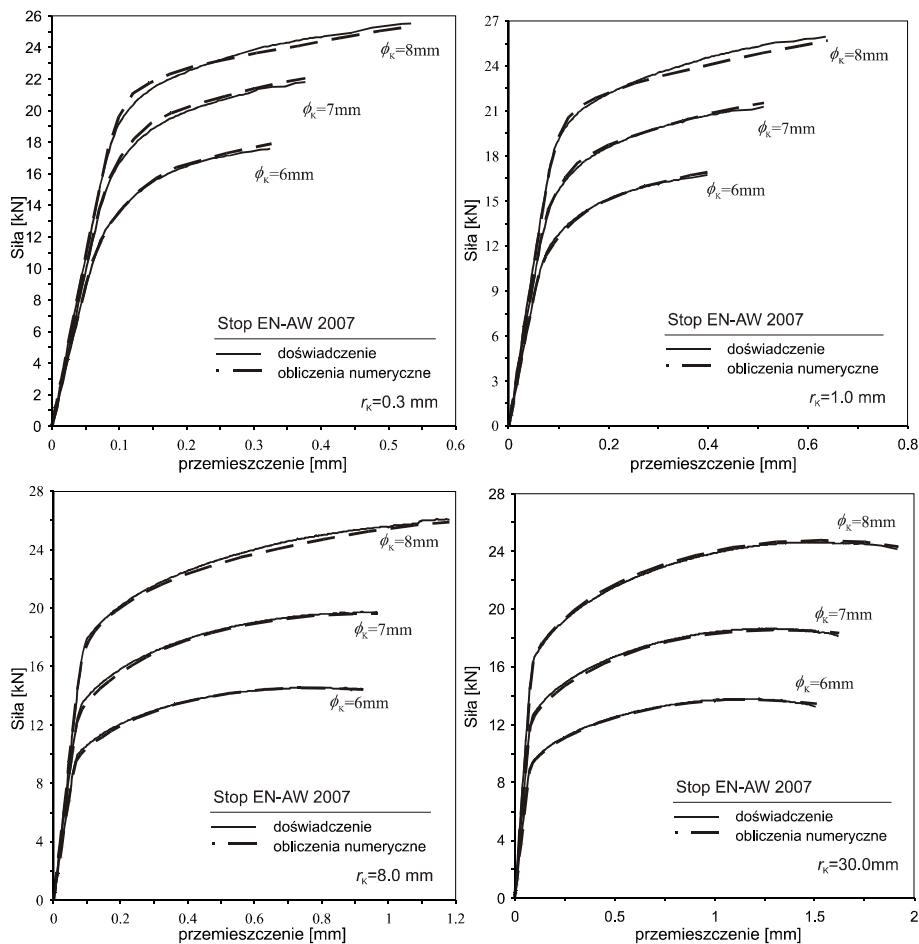
Weryfikacja hybrydowej (doświadczalnie – numerycznej) metody wyznaczania rzeczywistej krzywej umocnienia materiału polegała na porównaniu kształtu wykresów rozciągania (zależności siła rozciągająca – wydłużenie bazy pomiarowej $l_0 = 25$ mm) otrzymanej dla osiowosymetrycznych próbek z korbami o różnym promieniu zaokrąglenia dna karbu ($r_k = 0.3; 0.5; 1.0; 2.0; 4.0; 8.0; 15; 30$ mm) oraz o różnej średnicy w dnie karbu ($\phi_k = 6; 7; 8$ mm) (Derpeński, 2008). Kształt próbek przyjętych do analizy pokazano na Rys. 8.

Tab. 2. Wartości stałych materiałowych badanych stopów aluminium

Materiał	E [GPa]	ν	R_e [MPa]	R_u [MPa]
EN-AW 2007	73.965	0.32	317.11	572.86
EN-AW 2024	69.652	0.34	260.02	658.34

Tab. 3. Wartości odkształcenia osiowego w momencie pęknięcia (ε_f)

Materiał	Nr próbki	d_0 [mm]	d_f [mm]	ε_f
EN-AW 2024	1	8.00	6.55	0.40
	2	8.00	6.67	0.36
	3	7.99	6.50	0.41
	4	8.00	6.60	0.39
EN-AW 2007	1	8.00	7.04	0.26
	2	8.00	7.04	0.26
	3	8.00	7.02	0.26
	4	7.99	7.01	0.26



Rys. 10. Porównanie zależności siły od przemieszczenia otrzymanych z badań doświadczalnych i obliczeń numerycznych dla próbek o różnym promieniu zaokrąglenia karbu r_k (stop aluminium EN-AW 2007)

Przykładowe zależności siły od przemieszczenia dla wybranych próbek z korbami o różnym kształcie przedstawiono na rysunkach 9 i 10. Bardzo dobra zgodność wykresów siły w funkcji przemieszczenia bazy pomiarowej otrzymanych na podstawie obliczeń numerycznych i badań ekspe-

rymentalnych potwierdza poprawność przyjętych metod modelowania numerycznego oraz wyznaczania rzeczywistej krzywej umocnienia materiału. Błąd względny pomiędzy porównywanymi wykresami nie przekraczał bowiem 1.5%.

3. WNIOSKI

Wyznaczenie rzeczywistej krzywej umocnienia materiału wymaga zastosowania podejścia hybrydowego: badań eksperymentalnych, pozwalających na wyznaczenie zmiennych globalnych (np. obciążenia i wydłużenia krytycznego) oraz nieliniowych obliczeń numerycznych, które umożliwiają określenie lokalnych zmiennych stanu (składowych tensorów naprężenia i odkształcenia). Podejście to daje zdecydowanie dokładniejsze wyniki niż podejście tylko doświadczalne (z uwzględnieniem zmiany długości bazy pomiarowej oraz średnicy próbki), choć trudno określić błąd modelowania w zakresie dużych odkształceń plastycznych i powstawania „szyjki”.

Rozwinięcie tej metody może polegać na wykorzystaniu osiowosymetrycznych próbek z korbami o dużym promieniu zaokrąglenia dna karbu. Wówczas mamy prostsze modelowanie numeryczne. Podejście takie wymaga jednak przede wszystkim weryfikacji doświadczalnej oraz opracowania metodologii doboru kształtu próbki.

LITERATURA

1. **Derpeński Ł, Seweryn A.** (2010), Experimental research into fracture of EN-AW 2024 and EN-AW 2007 aluminum alloy specimens with notches subjected to tension, *Experimental Mechanics* (w druku).
2. **Derpeński Ł.** (2008), *Prognozowanie pęknięcia elementów z korbami wykonanych z materiałów sprężysto-plastycznych*, rozprawa doktorska, Wydział Mechaniczny Politechniki Białostockiej.
3. **Garud Y.S.** (1981), A new approach to the evaluation of fatigue under multiaxial loadings, *J. Engng. Mater. Technol., ASME*, 103, 118-125.
4. **Mróz Z.** (1967), *On the description of anisotropic workhardening*, *J. Mech. Phys. Solids*, 15, 163-175.
5. **PN-EN 10002-1:2002**, *Próba rozciągania, Metoda badań w temperaturze otoczenia*, PKN.
6. **Zienkiewicz, O.C.; Taylor, R.L.** (2000) *Finite Element Method*, Elsevier

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 uniaxial tensile test – FEM. Material resilient-plastic model with isotropic hardening and Huber – von Mises plasticity condition was used to describe the relations between the tension and axial strain in researched samples in plastic range. Hardening curves was determined by means of multiply repeated numeric calculations taking the “neck” creation effect into consideration. Experiments were performed on aluminum alloy EN-AW 2024 and EN-AW 2007.