

XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2024

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15-18 października 2024

Analiza typów zjawiska PLC przy użyciu miary *Sample Entropy*

Marzena Mucha¹

¹Katedra Technologii Informatycznych w Inżynierii, Politechnika Krakowska
email: marzena.mucha@pk.edu.pl

STRESZCZENIE: Praca jest poświęcona analizie efektu Portevin-Le Chatelier (PLC) przy użyciu miar entropii zwanych *Sample Entropy* oraz *Sample Entropy 2d*. Obie metody służą wykrywaniu wzorów w sygnałach i przekazują informacje na temat uporządkowania sygnałów. Efekt PLC jest zjawiskiem występującym w metalach w pewnych zakresach prędkości odkształceń i temperatur. Charakteryzuje się tzw. seracjami na ścieżce równowagi (powtarzającymi się zmianami osłabienie-wzmocnienie) i pasmami odkształceń, które propagują się w elemencie. Metody obliczania entropii mogą być użyte m.in. do rozpoznawania różnych typów efektu PLC. W pracy obliczenia zostały wykonane dla danych uzyskanych z badań eksperymentalnych przeprowadzonych dla rozciąganej próbki wiosełkowej ze stopu aluminium AW5083. Na podstawie zdjęć z sytemu DIC zostały rozpoznane różne typy efektu PLC, a obliczenia entropii wykazały, że charakteryzują się one innymi jej wartościami. Zatem można stwierdzić, że zaprezentowane metody mogą zostać użyte do rozpoznania typu PLC.

SŁOWA KLUCZOWE: niestacjonarności propagujące się, efekt Portevin-Le Chatelier, *Sample Entropy*

1. Wstęp

Celem pracy jest wykorzystanie miar entropii zwanych *Sample Entropy* (*SampeEn*) i *Sample Entropy 2d* (*SampEn2d*) do analizy wyników eksperymentalnych rozciągania próbek stopu aluminium AW5083 oraz zaproponowanie niezależnej miary, która mogłaby pomóc w identyfikacji typów zjawiska zwanego efektem Portevin-Le Chatelier (PLC).

Lokalizacja deformacji jest zjawiskiem występującym m. in. w metalach, polegającym na koncentracji odkształceń w części próbki, tworząc pasmo ścinania lub szyjkę, podczas gdy jej pozostała część się odciąża. Powoduje to znaczne osłabienie materiału. W konsekwencji może dojść do zniszczenia elementu i obiektu, którego jest on częścią. Lokalizacja może być spowodowana przez osłabienie geometryczne (duże deformacje), materiałowe i/lub termiczne. W niektórych materiałach występują niestacjonarne zjawiska lokalizacji, w których po początkowej lokalizacji pasmo propaguje się, przemieszcza lub przeskakuje. Przykładem takiego zjawiska jest efekt PLC [1,2]. Występuje on w materiałach takich jak stal (w podwyższonej temperaturze) i aluminium (w temperaturze pokojowej) w pewnym zakresie prędkości deformacji oraz temperatur. Charakterystyczne są dla niego seracje na wykresie siła-przemieszczenie (powtarzające się zmiany z osłabienia do wzmocnienia) oraz pasma, które pojawiają się w próbce. Wyróżniamy trzy główne typy efektu PLC. Typ A występuje w niskiej temperaturze i dla wysokiej prędkości deformacji, typ B dla średniej temperatury i średniej prędkości deformacji, a typ C dla wysokiej temperatury oraz niskiej prędkości deformacji. Każdy typ charakteryzuje się innym zachowaniem pasm, pasma typu A propagują się, pasma typu B przeskakują, natomiast pasma typu C pojawiają się w elemencie losowo. W [3,4] różne typy PLC zostały rozróżnione przy pomocy miary

entropii, która nazywa się *Sample Entropy*. Jest to wartość entropii dla sygnałów, używana m. in. do wykrywania chorób serca [5].

2. Miary *Sample Entropy* oraz *Sample Entropy 2d*

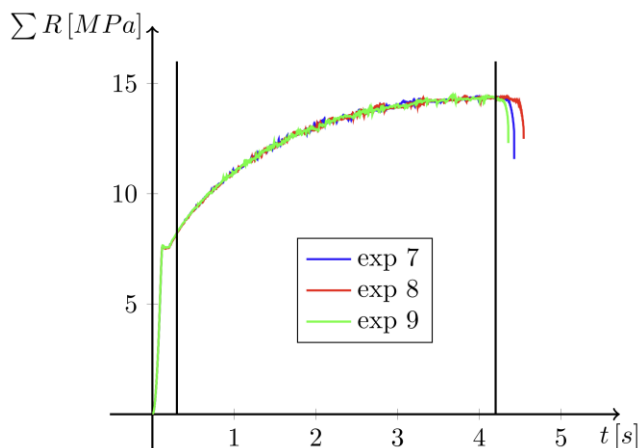
Miary entropii dla sygnałów mają długą historię, zaczynając od tzw. *Shannon Entropy*, wprowadzonej w 1948 roku [6]. *Sample Entropy* jest jedną z miar, która zwróciła uwagę osób badających zjawisko PLC i okazała się przydatna w zakresie rozróżniania typów tego zjawiska. *SampEn* szuka wzorów, im więcej powtarzalnych struktur tym wartość entropii jest niższa, im dane są bardziej chaotyczne, tym miara jest większa.

Algorytm obliczania *SampEn* jest następujący. Niezbędna jest seria danych w jednakowych dostępnach czasu $X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\}$, liczba wartości jest równa n . Następnie dane są dzielone na wektory dwuelementowe $Y_{21} = \{x_1, x_2\}$, $Y_{22} = \{x_2, x_3\}$, ..., $Y_{2n-1} = \{x_{n-1}, x_n\}$. Z wektorów liczona jest norma maksimum różnicy każdego dwóch różnych wektorów bez powtórzeń, następnie zliczana jest liczba wartości, które nie przekraczają 15% wartości odchylenia standardowego serii danych X . Liczbę takich wartości nazywamy n_2 . Następnie procedurę należy powtórzyć dla wektorów trójelementowych. Serię danych X dzielimy na wektory $Y_{31} = \{x_1, x_2, x_3\}$, $Y_{32} = \{x_2, x_3, x_4\}$, ..., $Y_{3n-2} = \{x_{n-2}, x_{n-1}, x_n\}$. Obliczamy normę maksimum różnicy każdego dwóch różnych wektorów bez powtórzeń, a następnie zliczamy liczbę wartości mniejszych od 15% odchylenia standardowego serii danych X . Liczbę tych wartości zapisujemy jako n_3 . *SampEn* jest równa logarytmowi naturalnemu z ilorazu wartości n_2 i n_3 .

W przypadku dwuwymiarowej serii danych (X, Y) postępujemy podobnie, z tym że wartością, z którą będzie porównywana norma maksimum, będzie średnia geometryczna odchylenia standardowego X i Y .

3. Opis danych eksperymentalnych

Badania eksperymentalne wykonano dla stopu aluminium AW5083. Próbka wiosełkowa była rozciągana z prędkościami: $4.3 \cdot 10^{-2/3-4}$, wykonano po trzy próby dla każdej prędkości. Pełny opis eksperymentów oraz dane można znaleźć w [7]. Z punktu widzenia tej pracy interesujące są jedynie wykresy sumy reakcji w funkcji czasu procesu. Taki wykres dla największej prędkości wraz z zaznaczeniem zakresu wartości wykorzystanych do obliczeń entropii został umieszczony na Rys. 1.



Rys. 1. Suma reakcji – czas procesu dla rozciąganej próbki.

Na podstawie obserwacji obrazów zarejestrowanych przez system DIC zostały rozróżnione typy PLC dla trzech prędkości deformacji. Wyniki zostały zebrane w Tab. 1.

Tabela 1. Podsumowanie obserwacji typów PLC

Prędkość deformacji	Typ PLC
niska	C
średnia	A+B
wysoka	A

4. Wyniki obliczeń i ich analiza

Sample Entropy jest wrażliwa na występowanie trendu i na krok czasowy. W związku z tym przed wykonaniem obliczeń wykonano dopasowanie funkcji eksponencjalnej, a wartości tej funkcji zostały odjęte od wartości eksperymentalnych, następnie dokonano interpolacji dla ustalonego kroku czasowego 0.001 s.

Sample Entropy 2d, zobacz [8], została użyta w celu eliminacji zależności od kroku czasowego, ale metoda ta może być wrażliwa na dominację wartości jednego z wymiarów (X lub Y). W związku z tym zostały podjęte następujące działania. Jak dla *SampEn* został usunięty trend przez dopasowanie funkcji eksponencjalnej. Następnie zostały wybrane tylko lokalne ekstrema, a wartości X przesunięto do początku układu współrzędnych. Następnie dane znormalizowano tak, aby mieściły się w przedziale od 0 do 1. Dla tak przygotowanych danych przeprowadzono właściwe obliczenia.

W Tab. 2 zostały zebrane uśrednione (dla trzech próbek na prędkość deformacji) wyniki dla *SampEn*, a w Tab. 3 dla *SampEn2d*. Zostały uzyskane różne wartości dla różnych prędkości deformacji. Zarówno *SampEn* jak i *SampEn2d* są największe dla wysokiej prędkości deformacji,

a najmniejsze dla niskiej. Porównując wyniki z Tab. 1 wynika, że typ A charakteryzuje się większym uporządkowaniem niż typ C. Trzeba podkreślić, że brak jest wyników dla typu B, który jest przemieszany z typem A dla średniej prędkości odkształcenia.

Tabela 2. *SampEn* dla różnych prędkości odkształceń

Prędkość deformacji	<i>SampEn</i>
niska	0.0163031
średnia	0.1221316
wysoka	0.2608631

Tabela 3. *SampEn2d* dla różnych prędkości odkształceń

Prędkość deformacji	<i>SampEn2d</i>
niska	0.8348787
średnia	1.0589899
wysoka	3.4257643

5. Podsumowanie

Zostały wykonane obliczenia miar *Sample Entropy* oraz *Sample Entropy 2d* dla badań eksperymentalnych, w których zaobserwowano zjawisko PLC.

1. *Sample Entropy* oraz *Sample Entropy 2d* pozwalają odróżnić typy PLC
2. *Sample Entropy* wymaga większej ilości operacji ze względu na konieczność porównania wyników dla tych samych kroków czasowych i tym samym konieczność interpolacji wartości
3. *Sample Entropy 2d* dla znormalizowanych danych wydaje się obiecującą wartością, która może pomóc rozróżnić typy PLC
4. Niezbędna jest większa ilość danych, które pozwolą na weryfikację otrzymanych wyników.

Praca została wykonana w ramach grantu Weave-UNISONO przyznanego przez Deutsche Forschungsgemeinschaft (nr 527828607) oraz Narodowe Centrum Nauki (nr 2023/05/Y/ST8/00006)

Literatura

- [1] Portevin A., le Chatelier F., Sur un phenomene observe lors de lessai de traction dalliages en course de transformation, *Comptes rendus de l'Academie des Sciences*, 176, 507–510, 1923.
- [2] Yilmaz A., The Portevin–Le Chatelier effect: a review of experimental findings, *Science and Technology of Advanced Materials*, 12, 6, 2011.
- [3] Sarkar A., Barat P., Mukherjee P. Multiscale Entropy Analysis of the Portevin-Le Chatelier Effect in an Al-2.5%Mg Alloy, *Fractals*, 18, 2010.
- [4] JXu J., Chen G., and Fu S. Complexity analysis of the Portevin-Le Chatelier in an Al alloy at different temperatures. *Theoretical and Applied Mechanics Letters*, 11(2), Article 100233, 2021.
- [5] Horie T., Burioka N., Amisaki T., Shimizu E., Sample Entropy in Electrocardiogram During Atrial Fibrillation, *Yonago Acta Med.*, 61(1), 49–57, 2018.
- [6] Shannon C. E. A mathematical theory of communication. *The Bell System Technical Journal*, 27(3):379–423, 1948.
- [7] Mucha M, Rose L., Weislo B., Menzel A., and Pamin J. Experiments and numerical simulations of Lueders bands and Portevin-Le Chatelier effect in aluminium alloy AW5083. *Arch. Mech.*, 75(3):301–336, 2023.
- [8] Wu H., Zhou J., Xie C., Zhang J. and Huang Y. Two-Dimensional Time Series Sample Entropy Algorithm: Applications to Rotor Axis Orbit Feature Identification, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 2021.