

# XVII Konferencja Naukowo-Techniczna

# TKI2024

## TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

15–18 października 2024

### Badania doświadczalne jakości powierzchni kształtowanych blach metodą spekli laserowych

Sławomir Świllo

Wydział Mechaniczny Technologiczny, Politechnika Warszawska  
email: slawomir.swillo@pw.edu.pl

**STRESZCZENIE:** Obecne wymagania przemysłowe dotyczące kształtowanych blach sprawiają, że konieczne jest opracowanie rozwiązania do pomiaru jakości powierzchni, takiego jak identyfikacja samych wad, ale także przeznaczonego do kontroli stanu powierzchni po odkształceniu. W związku z tym autor proponuje metodę spekli laserowych, dobrze znaną technikę, która zapewnia szybką i bezkontaktową metodę pomiaru wielkości topograficznych, takich jak kształt lub jakość wytwarzanych produktów. Efekt spekli laserowych powstaje, gdy spójne światło pada na szorstką powierzchnię, co powoduje ich losowe rozpraszanie. Generowane jest pole jasnych i ciemnych obszarów, które jest bezpośrednio związane ze strukturą geometryczną powierzchni. W celu znalezienia korelacji między wielkością odkształcenia powierzchni blachy, a jej jakością w stochastycznej analizie spekli, przeprowadzono pomiary optyczne dla płaskiej próbki po jednoosiowej próbie rozciągania. Końcowa ocena procesu deformacji pokazuje, że specjalnie zaprojektowany układ optyczny i oprogramowanie Matlab, (opracowane zarówno do rejestracji obrazów, jak i do analizy cech statystycznych drugiego rzędu za pomocą dyskretnej, szybkiej transformaty Fouriera), daje możliwość zastosowania tej techniki w dziedzinie kontroli jakości kształtowanych blach.

**SŁOWA KLUCZOWE:** metoda spekli laserowych, kształtowanie blach, autokorelacja

#### 1. Wprowadzenie

Współczesna obróbka plastyczna stawia na zaawansowane rozwiązania umożliwiające skuteczne projektowanie, symulowanie i modelowanie procesów wytwarzania. Stale rosnące oczekiwania, motywują do nowych wyzwań w obszarze obróbki plastycznej, co pozwala na skuteczne utrzymywanie wysokiej pozycji wśród innych technik wytwarzania. O popularności tej technologii może świadczyć statystyczny samochód, który w 90% składa się z elementów powstałych w procesach obróbki plastycznej metali [1]. Szczególnym przykładem stawianych technologicznych i technicznych wyzwań jest obróbka plastyczna blach, jedna z najpopularniejszych technologii otrzymywania wyrobów gotowych w niemal każdym sektorze produkcji przemysłowej, szczególnie w przemyśle motoryzacyjnym [2]. Do podstawowych wyzwań należy przede wszystkim, wyższa jakość wyrobów uzyskiwanych w procesie obróbki plastycznej blach. Oczekuje się, że w zbliżającym się czasie ten proces wytwarzania zostanie skutecznie poprawiony dzięki osiągnięciom rewolucji przemysłowej, na każdym etapie technologii wytwarzania, w tym właśnie w szczególności w zakresie kontroli jakości [3].

#### 2. Przedmiot i cele pracy

Obserwując proces technologiczny kształtowania blach można wskazać na liczne czynniki, które przyczyniają się do potrzeby opracowania skutecznych i niezawodnych rozwiązań pomiaru jakości tych wyrobów. Do najważniejszych zaliczyć należy rosnące oczekiwania poprawy wpływu procesu wytwarzania i samych wyrobów na środowisko naturalne w sektorze motoryzacyjnym,

zgodnie z zaleceniami środowiskowymi UE, gdzie stawia się duży nacisk na eliminację gazów cieplarnianych. Te wytyczne UE prowadzą do poszukiwania lżejszych i bardziej bezpiecznych konstrukcji, tworzonych na bazie stopów aluminium i zaawansowanych stali o wysokiej wytrzymałości [4]. Inny ważnym aspektem, wpływającym na potrzebę dążenia do opracowania nowych rozwiązań pomiaru jakości jest ciągła niedoskonałość rozwiązań modelowania komputerowego procesów wytwarzania. Pomimo, że prace te zmierzają do określenia skutecznych warunków realizacji procesów technologicznych wykonania wyrobu, często mamy do czynienia z wadami produkcyjnymi. Jakość bowiem części formowanych z blachy jest silnie uzależniona od zastosowanego materiału arkusowego, materiału powłokowego i narzędziowego, smarowania i warunków procesu. Chociaż tarcie ma kluczowe znaczenie, obecnie nie jest ono szczegółowo uwzględniane w modelowaniu komputerowym kształtowania blach. Ponadto, większość podejść do sterowania obróbką plastyczną blach ma na celu jedynie kontrolę przebiegu procesu kształtowania i optymalizację ustawień parametrów prasy, a nie kontrolę stanu jakości wyrobu końcowego [2]. Brak wyraźnego symulowania takich złożonych zależności wynika ze: zmieniających się warunków produkcji, stanu materiału, złożonych kształtów wyrobu, wysokiej tolerancji, co prowadzi do wyższych kosztów i przestojów procesów [3]. Dlatego też problem monitorowania stanu online kształtowanych wyrobów jest zagadnieniem niezwykle istotnym, częściowo wzmocnionym przez czwartą rewolucję przemysłową, która promuje wykorzystanie systemów informatycznych w nowoczesnych fabrykach [4]. Prowadzić to może to w pełni

automatycznych linii produkcyjnych z możliwością stałego monitorowania wykonywanych wyrobów.

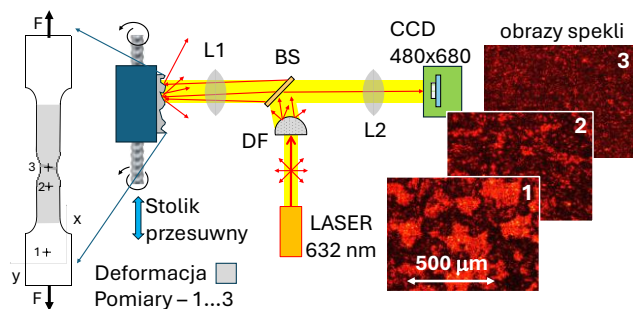
### 3. Warunki eksperymentu

W prezentowanych badaniach zastosowano powszechnie stosowaną stal przemysłową DC04. Skład chemiczny stali został przedstawiony w Tab. 1. W operacji wykrawania arkusza blachy, przygotowano znormalizowane próbki o grubości 1 mm, które poddano jednoosiowemu rozciąganiu.

Tabela 1. Skład chemiczny materiału

Material	C [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	F [%]
DC04	0.055	0.25	0.01	0.008	99.5

Następnie przeprowadzony został pomiar doświadczalny próbki w trzech obszarach deformacji (Rys.1), z wykorzystaniem układu optycznego z efektem wstecznego obrazowania spekli. W układzie tym, wiązka światła koherentnego (632 nm, 5mW) pada na badaną, chropowatą powierzchnię i podlegając losowemu rozproszeniu tworzy efekt spekli. Dla lepszego uwidocznienia morfologii badanej powierzchni, w układzie optycznym zastosowano rozdzielanie wiązki (BS), rozproszenie wiązki (DF) i jej skupienie (soczewki: L1, L2). Obrazy spekli zostały zarejestrowane dzięki matrycy CCD (640x480 pikseli) i poddane numerycznej analizie (Rys.1).



Rys. 1. Schemat optycznego układu pomiarowego

### 4. Wyniki badań i ich analiza

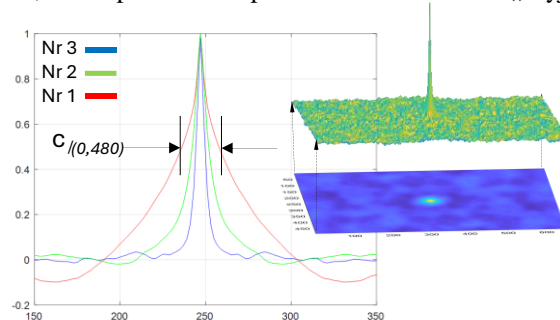
Laserowe wzory spekli uzyskano oświetlając chropowatą powierzchnię przez spójne źródło światła lasera w dużym powiększeniu obrazu ( $X5$ ,  $\xi = \frac{580 \text{ pikseli}}{500 \mu\text{m}}$ ). Do powstania zaobserwowanych wzorów przyczyniło się zarówno zjawisko interferencji, jak i znacznego rozproszenia światła laserowego, co doprowadziło do powstawania pól składających się z jasnych i ciemnych obszarów. Zróżnicowane wielkości tych wzorów poddane zostały analizie statystycznej, co bezpośrednio związane jest z geometrią powierzchni. Podczas gdy właściwości statystyczne pierwszego rzędu są wystarczające jedynie do opisu fluktuacji jasności, to właściwości statystyczne drugiego rzędu stosuje się do opisu innej podstawowej właściwości spekli, jej zróżnicowania struktury przestrzennej. Dlatego, z uwagi na charakter uzyskiwanych wzorów spekli, ważnym parametrem stała się wielkość powstających skupisk spekli. Rozkład losowy tych spekli na oświetlonej powierzchni prowadzi do spostrzeżenia, że nie ma tu dobrze zdefiniowanego rozmiaru, występuje jedynie miara średniej wielkości oświetlonych obszarów. Dlatego, w celu oszacowania średniej wielkości skupisk spekli, obliczona została znormalizowana funkcja autokorelacji dla

zaobserwowanych wzorów na badanej płaszczyźnie [5]. Zastosowane w tym podejściu twierdzenie o splocie dwóch funkcji [6], pozwoliło na znaczne uproszczenie procedury obliczeniowej autokorelacji, zgodnie z zapisem:

$$C_{I(\Delta m, \Delta n)} = \frac{DTFT^{-1}[DFT\{I(x_m, y_n)\}^2] - \langle I \rangle^2}{\langle I(x_m, y_n) \rangle^2 - \langle I(x_m, y_n) \rangle^2} \quad (1)$$

gdzie:  $DTFT$  – oznacza szybką transformatę Fouriera dla obrazu spekli  $I$ ,  $DTFT^{-1}$  – oznacza transformatę odwrotną,  $\langle I \rangle$  – średnią wartość intensywności obrazu spekli.

Uzyskane wyniki pozwalają stwierdzić, że wielkość skupisk spekli dla zarejestrowanych obrazów, wykazuje daleko idące zróżnicowanie (Rys. 2). Uzyskano następujące wyniki średniej wielkości skupisk spekli: dla powierzchni niezdeformowanej – 25 pikseli, dla zdeformowanej – 10 pikseli, oraz 6 pikseli – dla powierzchni w obszarze „szyjki”.



Rys. 2. Zestawienie wyników autokorelacji

### 5. Podsumowanie

Podsumowując przeprowadzone badania w zakresie oceny jakości kształtowanych blach można sformułować następujące wnioski:

- 1) Zaprojektowany układ optyczny umożliwił rejestrację zmian rozproszenia obrazu spekli w świetle koherentnym dla próbki rozciąganej.
- 2) Zaproponowana metoda autokorelacji pozwala na wskazanie zmian w analizowanych wielkościach topologii powierzchniowej, towarzyszących jednoosiowemu odkształceniu plastycznemu.
- 3) Planowane są badania doświadczalne w zakresie możliwości zastosowania zaproponowanej metody w kontroli jakości wyrobów uzyskiwanych w procesie głębokiego tłoczenia blach.

### Literatura

- [1] Gronostajski, Z.; Pater, Z.; Madej, L.; Gontarz, A.; Lisiński, L.; Lukaszek-Solek, A.; Luksza, J.; Mróz, S.; Muskalski, Z.; Muzykiewicz, W.; et al. *Recent development trends in metal forming*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. 19, No. 3, pp. 898–941, 2019.
- [2] Tomasz Trzepieciński, *Recent Developments and Trends in Sheet Metal Forming*, Metals, Vol. 10(6), 779, pp. 1-54, 2020.
- [3] Manopulo N. et al, *On the mechanics of edge cracking and the reliable determination of edge formability limits*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1157 012055, pp.1-8, 2021.
- [4] Pereira, Rui & Peixinho, Nuno & Costa, Sérgio. *A Review of Sheet Metal Forming Evaluation of Advanced High-Strength Steels (AHSS)*. Metals. Vol. 14(4), 394, pp. 1-50, 2024.
- [5] Postnov, D.D., Cheng, X., Erdener, S.E. & David A. Boas. *Choosing a laser for laser speckle contrast imaging*. Scientific Reports Vol. 9, 2542, pp. 1-6, 2019.
- [6] Buijs, J., Gucht, J.v.d. & Sprakel, J. *Fourier transforms for fast and quantitative Laser Speckle Imaging*. Scientific Reports. Vol. 9(1), 13279, pp. 1-9, 2019.