

Daniel Pociecha*, Mirosław Jabłoński**

Stanowisko wizyjnego śledzenia odkształceń metalu w procesie obróbki plastycznej na zimno

1. Wprowadzenie

W artykule zaprezentowano nowatorską metodę empirycznego wyznaczania odkształceń w procesie walcowania pielgrzymowego. Ze względu na charakter procesu, trudno jest prowadzić pomiary bezpośrednio w warunkach przemysłowych, dlatego w badaniach wykorzystano walcarkę modelową. Do celów pomiarowych zbudowane zostało stanowisko wizyjnego śledzenia odkształceń w trakcie walcowania. Dzięki uzyskanym wynikom możliwa będzie m.in. weryfikacja modelu matematycznego. Oba modele posłużą jako baza do programu umożliwiającego projektowanie optymalnego kształtu narzędzi (walców i trzpień) do procesu pielgrzymowania [9]. Optymalny kształt narzędzi jest istotny z punktu widzenia przebiegu każdego procesu przeróbki plastycznej [6].

2. Obróbka plastyczna – walcowanie pielgrzymowe rur

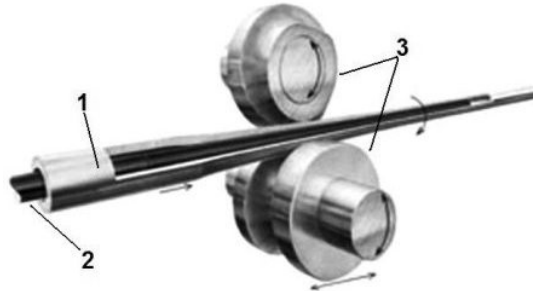
Wysokie wymagania klientów, w zakresie jakości produktów uzyskiwanych metodą przeróbki plastycznej na zimno, wymuszają na producentach ciągłe doskonalenie techniki projektowania narzędzi, przebiegu odkształcenia metalu oraz kontroli gotowego wyrobu. Z drugiej strony, czynniki ekonomiczne wymuszają utrzymanie wysokiej wydajności, uzyskanie jak najlepszej jakości produktu, przy małym odpadzie. Oprócz wiedzy empirycznej konieczne jest modelowanie procesów obróbki plastycznej. Coraz większym zainteresowaniem cieszą się różne techniki wspomagające pracę inżynierów i technologów, w szczególności wizyjne metody pomiarowe. Zasadniczą zaletą tego typu urządzeń jest łatwość ich zastosowania, nieinwazyjność, szybkość i duża dokładność pomiaru.

W zakresie wizyjnych systemów pomiarowych w obróbce plastycznej, jedną z wiodących europejskich firm, jest niemiecka firma GOM [19]. Oferuje ona narzędzia służące

* Katedra Przeróbki Plastycznej i Metaloznawstwa Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

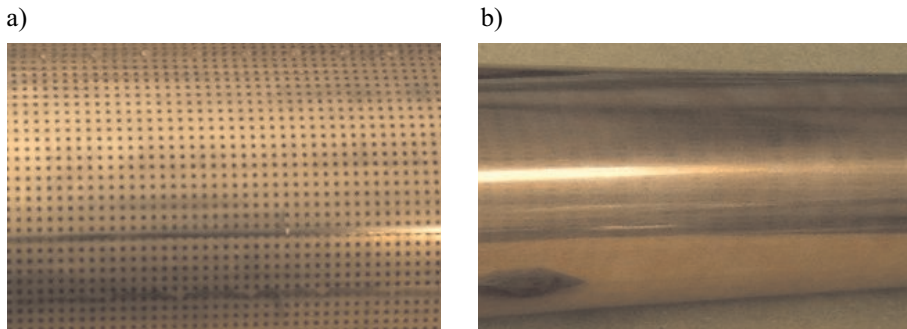
** Katedra Automatyki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

m.in. do pomiarów odkształceń, kontroli jakości gotowego wyrobu, skanowania 3D czy inżynierii odwrotnej [19]. W literaturze [3, 14, 17, 18], znaleźć można wiele prac wykorzystujących te, lub inne podobne systemy, do pomiarów odkształceń w różnych procesach przeróbki plastycznej. Autor nie znalazł jednak prac opisujących techniki wizyjne użyte do procesów, w których występują bardzo duże cykliczne odkształcenia metalu. Jednym z takich procesów jest walcowanie pielgrzymowe rur na zimno (rys. 1).



Rys. 1. Klasyczny proces walcowania rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych:
1 – walcowana rura, 2 – trzpień, 3 – walec dolny i górny (w przekroju)

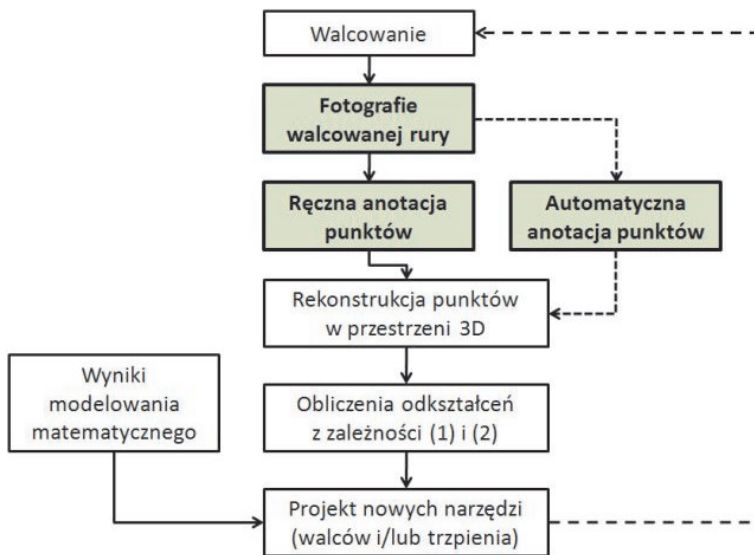
Autorzy pracy [19] podjęli próbę wykorzystania systemu ARGUS do pomiarów odkształceń, w przemysłowej walcierce pielgrzymowej. Wyniki pomiarów zaprezentowano w pracy [2]. Niestety adaptacja systemu ARGUS (dedykowanego dla pomiarów odkształceń powierzchniowych) do zastosowania przy walcowaniu pielgrzymowym nie przyniosła oczekiwanych rezultatów. Ze względu na duże odkształcenia metalu w trakcie walcowania, naniesiona powierzchniowo siatka koordynacyjna wykorzystywana w pomiarach, zostaje rozmyta lub całkowicie zatarta i jest nie jest rozpoznawana przez system ARGUS (rys. 2). Uzasadniona jest zatem, podjęta przez autorów niniejszej publikacji próba opracowania metody pomiaru, niewrażliwej na duże deformacje odkształcanego metalu.



Rys. 2. Siatka koordynacyjna, wykorzystywana w systemie ARGUS, naniesiona na miedzianej rurze przed walcowaniem (a) i po walcowaniu (b) [2]

3. Modelowanie matematyczne odkształceń

Metoda walcowania pielgrzymowego znalazła szerokie zastosowanie w przemyśle do produkcji wysokojakościowych rur stalowych oraz z metali nieżelaznych i ich stopów, w szczególności z materiałów trudno odkształcalnych [8]. Zarówno badania naukowe, jak i praktyka przemysłowa potwierdziły, że szczególnie ważne jest zaprojektowanie optymalnego kształtu narzędzi. Rozwiązanie zadania optymalizacji kalibrowania narzędzi jest bardzo złożone [9] i wymaga m.in. określenia z możliwie dużą dokładnością rozkładów odkształceń na długości stożka roboczego. Komputerowe systemy wspomaganie projektowania narzędzi mają wbudowany moduł do obliczenia pól odkształceń w jednym cyklu roboczym metodą modelowania matematycznego, posługując się metodą różnic skończonych lub elementów skończonych [13, 16]. W pracach Mulota [7], Lodeja [4] czy Montmionneta [5] zaprezentowane są modele matematyczne procesu walcowania pielgrzymowego. Nie zamieszczono jednak informacji na temat weryfikacji tych modeli na podstawie modelu empirycznego lub w warunkach przemysłowych.



Rys. 3. Schemat toku postępowania przy projektowaniu narzędzi do walcowania pielgrzymowego – modelowanie empiryczne

Modelowanie empiryczne (rys. 3) opiera się na obserwacjach płynięcia metalu w trakcie odkształcenia. Jest to możliwe jedynie wtedy, gdy na odkształcanym materiale widoczne są punkty charakterystyczne, na podstawie których śledzona jest historia odkształcenia metalu [12]. Dysponując informacją, na temat położenia tych punktów przed odkształceniem i po odkształceniu, można obliczyć pole przemieszczeń w pojedynczym cyklu roboczym.

Jeżeli pole przemieszczenia w cyklu roboczym jest określone zależnością (1) to składowe stanu odkształcenia w każdym punkcie stożka roboczego określają zależności (2), gdzie w przybliżeniu pochodne cząstkowe mogą być zastąpione ilorazami różnicowymi [10].

$$\left. \begin{aligned} u &= g_1(x, y, z) \\ v &= g_2(x, y, z) \\ w &= g_3(x, y, z) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left\| \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{\delta u}{\delta x} \approx \frac{\Delta u}{\Delta x} \\ \varepsilon_y &= \frac{\delta v}{\delta y} \approx \frac{\Delta v}{\Delta y} \\ \varepsilon_z &= \frac{\delta w}{\delta z} \approx \frac{\Delta w}{\Delta z} \end{aligned} \right\| \left\| \begin{aligned} \gamma_{xy} &= \frac{\delta v}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta y} \approx \frac{\Delta v}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta y} \\ \gamma_{yz} &= \frac{\delta w}{\delta y} + \frac{\delta v}{\delta z} \approx \frac{\Delta w}{\Delta y} + \frac{\Delta v}{\Delta z} \\ \gamma_{zx} &= \frac{\delta w}{\delta x} + \frac{\delta u}{\delta z} \approx \frac{\Delta w}{\Delta x} + \frac{\Delta u}{\Delta z} \end{aligned} \right\| \quad (2)$$

gdzie:

- x, y, z – współrzędne punktu pomiarowego po odkształceniu,
- u, v, w – składowe stanu przemieszczenia dla współrzędnych x, y, z ,
- $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$ – odkształcenia liniowe,
- $\gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ – odkształcenia postaciowe.

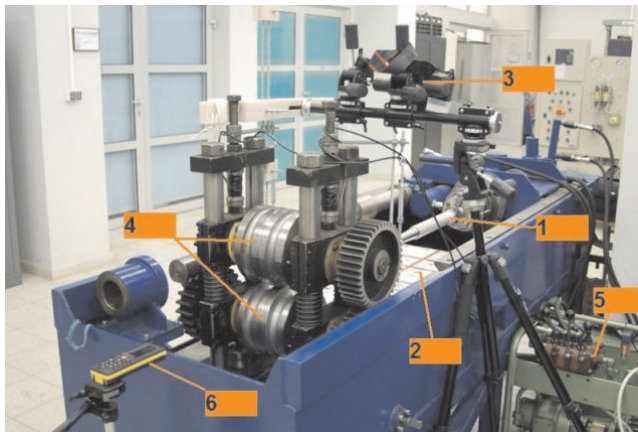
Informację na temat położenia punktów siatki uzyskać można na kilka sposobów. W przypadku zadania 2D można ręcznie mierzyć odległości pomiędzy węzłami siatki. Taka metoda jest jednak bardzo czasochłonna i niedokładna. Sytuacja komplikuje się jeszcze bardziej, gdy należy mierzyć koordynaty w trzech wymiarach, ręczny pomiar jest wtedy niemożliwy. Zadanie wyznaczenia punktów w przestrzeni 3D jest możliwe przy wykorzystaniu metody stereofotogrametrycznej [11]. Na podstawie informacji z jednej pary fotografii, wykonanych z przemieszczeniem aparatu rzędu kilkunastu centymetrów, można obliczyć współrzędne przestrzenne wszystkich punktów charakterystycznych znajdujących się na zdjęciach.

4. Wizyjne stanowisko pomiarowe

4.1. Modelowa walcarka pielgrzymowa

Na rysunku 4 zaprezentowano model walcarki pielgrzymowej wraz ze stanowiskiem pomiarowym. W procesie walcowania pielgrzymowego, rura odkształcana jest w kilku lub kilkunastu cyklach roboczych – w zależności od rodzaju metalu lub stopu. Cykl roboczy rozpoczyna się, gdy sanie znajdują się w przednim martwym położeniu PMP (po stronie

rury gotowej). Wtedy wykonuje się posuw i obrót o kąt 60° walcowanej rury. Podczas przejścia sań w tylne martwe położenie TMP (po stronie rury wsadowej) następuje odkształcenie plastyczne, a po ich zatrzymaniu wykonuje się obrót rury. Ruchowi sań w PMP także towarzyszy odkształcenie plastyczne. Dokładny opis procesu znaleźć można w literaturze [8, 9].



Rys. 4. Modelowa walcarka pielgrzymowa wraz ze stanowiskiem pomiarowym: 1 – walcowana rura z punktami testowymi, 2 – plansza referencyjna, 3 – aparat fotograficzny, 4 – walec górny i dolny, 5 – napęd walcarki, 6 – dalmierz zapewniający osiowość pomiarów w trakcie obrotu

4.2. Plansza referencyjna

Do pomiarów stereofotogrametrycznych niezbędne jest zastosowanie planszy referencyjnej (rys. 5). Na jej powierzchni umieszczone są ponumerowane punkty. Pozycja wszystkich punktów jest znana – wyznaczona została metodami geodezyjnymi. W czasie wykonywania zdjęć istotne jest, by plansza referencyjna, na której są umieszczone są ponumerowane punkty, znajdowała się w polu widzenia aparatu. Na każdym zdjęciu musi być widocznych przynajmniej 10 punktów referencyjnych, względem których orientowane są punkty pomiarowe. Do rekonstrukcji punktów w przestrzeni 3D, każdy z nich musi być dokładnie oznaczony na zdjęciu. Średni błąd z oznaczenia wszystkich punktów referencyjnych nie może być większy niż 0,5 px.



Rys. 5. Wycinek planszy referencyjnej: 1 – punkty referencyjne, 2 – fragment aluminiowej rury z punktami pomiarowymi

4.3. Aluminiowa próbka materiału

Rura przeznaczona do walcowania wykonana jest z aluminium technicznego (99,7%). Aluminium jest w stanie miękkim, co ułatwia płynięcie metalu, występują również mniejsze siły działające na narzędzia. Początkowy wymiar rury to $45 \times 4,5$ mm, po walcowaniu rura ma wymiary $24 \times 1,7$ mm. Występujące duże odkształcenia oraz tarcie, wymuszają zastosowanie środka smarnego, w tym wypadku jest to olej mineralny.

4.4. Aparat fotograficzny

Do pomiarów użyto aparatu Canon 50D z obiektywem Sigma 18–125 mm F3.8–5.6 DC OS HSM Canon, z ustawioną na stałe ogniskową 18 mm. Jest to obiektyw przystosowany do matryc APS-C. Aparat wykonuje zdjęcia z maksymalną rozdzielczością $4752(h) \times 3168(v)$. Duża rozdzielczość wykonywanych zdjęć jest wskazana w tego typu pomiarach [1]. Obiektyw posiada niską dystorsję oraz aberrację chromatyczną, aby jednak zminimalizować ich wpływ na dokładność pomiaru, należy przeprowadzić kalibrację aparatu z obiektywem. W wyniku tego zabiegu uzyskujemy współczynniki wielomianu dystorsji, które są uwzględniane podczas rekonstrukcji współrzędnych punktów.

Aparat fotograficzny zamontowany jest na statywie (rys. 6), na wysokości ok. 80 cm od planszy referencyjnej. Walcowana rura zamocowana jest ok. 20 cm nad planszą. Aby uzyskać zadowalającą głębię ostrości, zdjęcia muszą być wykonywane z maksymalną wartością przysłony. W czasie wykonywania fotografii, użyto lampy błyskowej Canon Speedlite 580 EX II z dyfuzorem.

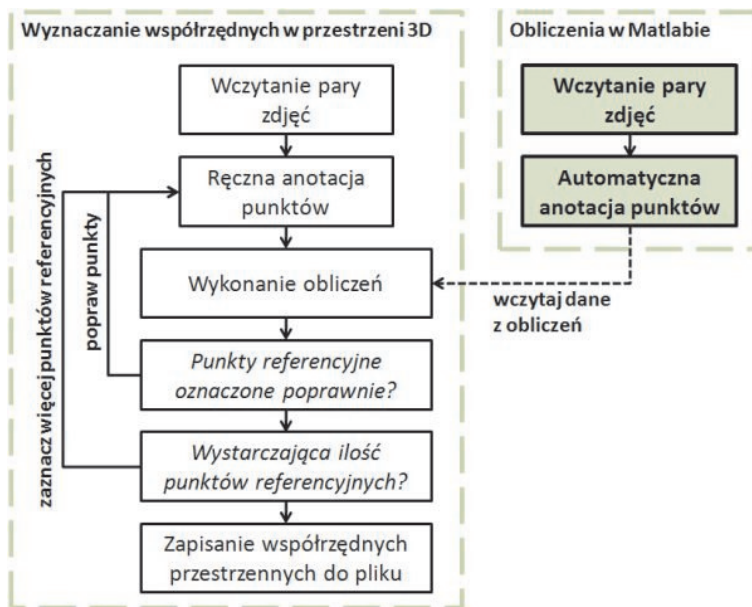


Rys. 6. Aparat fotograficzny zamontowany na poziomym statywie

4.5. Oprogramowanie

Rekonstrukcja współrzędnych punktów w przestrzeni 3D wykonywana jest za pomocą komercyjnego oprogramowania FotoGrant2008, którego sieć działań chroniona jest prawem autorskim. Zasada działania programu opiera się na znanej metodzie stereofotogrametrii [11, 20].

Proces wyznaczania współrzędnych w przestrzeni trójwymiarowej zaprezentowany jest na rysunku 7. Po wczytaniu pary zdjęć należy zaznaczyć i opisać punkty referencyjne oraz pomiarowe na obu zdjęciach. Istnieje również możliwość zaimportowania współrzędnych obrazowych, w tym wypadku uzyskanych z obliczeń w Matlabie. Mało dokładne oznaczenie punktów referencyjnych, podczas ręcznej anotacji, będzie skutkowało wystąpieniem błędu w trakcie obliczeń. Należy wtedy dokonać korekty oznaczenia punktów. Zbyt duży błąd obliczeń wystąpi również, gdy na zdjęciu znajdzie się niewystarczająca liczba punktów referencyjnych (minimalnie 10).



Rys. 7. Proces wyznaczania współrzędnych w przestrzeni trójwymiarowej

Procedura automatycznej anotacji punktów referencyjnych napisana została w środowisku Matlab R2009b. Wybór tego środowiska podyktowany został:

- łatwością tworzenia aplikacji okienkowych,
- szeroką bazą funkcji, umożliwiających przetwarzanie obrazu,
- brakiem konieczności tworzenia aplikacji czasu rzeczywistego.

5. Metoda pomiaru odkształceń

5.1. Przygotowanie próbki do pomiaru odkształceń

Uzyskanie trwałej i gęstej siatki na owalnej powierzchni rury jest zadaniem trudnym. Siatki naniesione powierzchniowo metodami elektrochemicznymi [2] czy chemicznymi

wykazują małą trwałość na ścieranie, dlatego siatkę naniesiono metodą sztyftów [10]. Metoda ta polega na mechanicznym umieszczeniu w badanym materiale innego, kontrastującego materiału. Jest ona niewrażliwa na duże odkształcenia, ale niestety zaburza spójność metalu badanego. Do celów doświadczenia, wykorzystano miedziane sztyfty, które posiadają własności plastyczne zbliżone do aluminium i dobrze kontrastują z nim pod względem barwy. W pierwszej kolejności, na rurze o wymiarach 45×4,5 mm, wykonano 600 otworów, za pomocą strumienia wody pod dużym ciśnieniem. Następnie w otworach umieszczono miedziane sztyfty, każdy o średnicy 1,5 mm (rys. 8). Tak przygotowana rura zamontowana zostaje w walcierce pielgrzymowej, gdzie poddana jest walcowaniu.



Rys. 8. Aluminiowa rura z miedzianymi sztyftami (punkty pomiarowe)

5.2. Ręczna anotacja punktów

Przykładowe zdjęcia uzyskane w trakcie próby walcowania pielgrzymowego przedstawione są na rysunku 9. W kadrze aparatu fotograficznego, znajduje się ok. 30 punktów bazowych, oraz ok. 200 punktów pomiarowych. Jest to liczba wystarczająca do przeprowadzenia rekonstrukcji współrzędnych punktów pomiarowych w przestrzeni 3D za pomocą obliczeń stereofotogrametrycznych.

Dla każdej pary fotografii wyznaczamy współrzędne przestrzenne punktów. Należy za pomocą kursora myszki wskazać punkty referencyjne i pomiarowe znajdujące się na zdjęciach, a następnie zapisać je pod odpowiednią nazwą. Kompletny opis punktu pokazany jest poniżej (3). Wyróżnia się trzy rodzaje punktów (dwa rodzaje referencyjnych i jeden rodzaj pomiarowych). Pierwszy rodzaj to punkty bazowe ‘B’, których numeracja rozpoczyna się od cyfr: ‘0’ do ‘5’. Ich pozycja jest stała a ilość ograniczona. Punkty, których numeracja rozpoczyna się od ‘6’ do ‘9’ są to punkty referencje dodatkowe ‘D’. Ich rozmieszczenie i ilość jest dowolna, zaś celem ich zastosowania jest zwiększenie dokładności obliczeń. W dalszej części artykułu oba typy punktów będą nazywane ogólnie punktami referencyjnymi, bez rozdzielenia na typ ‘B’ i ‘D’. Ostatni rodzaj punktów, to punkty pomiarowe ‘N’.

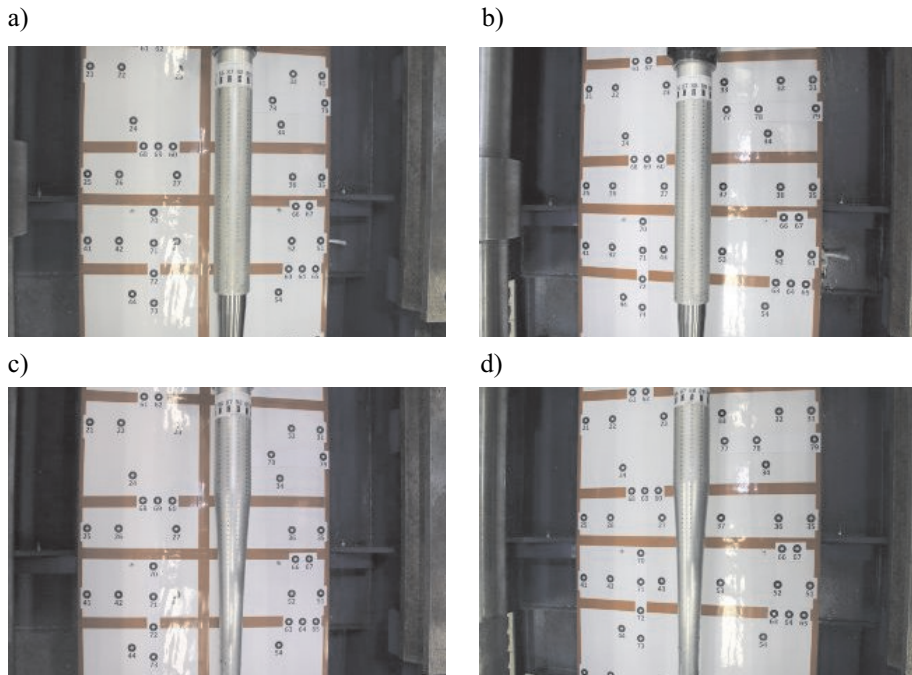
$$[TYP][NAZWA][WSP.X][WSP.Y] \quad (3)$$

gdzie:

TYP – typ punktu: ‘B’ lub ‘D’ – referencyjny, ‘N’ – pomiarowy,

NAZWA – nazwa punktu: dla punktów bazowych to numer punktu, dla pomiarowych jego położenie w odpowiedniej kolumnie i wierszu (przykładowo 1_15 – 1 kolumna, 15 wiersz,

WSP.X/Y – współrzędne punktu określane automatycznie po wskazaniu kursorem.



Rys. 9. Pary zdjęć uzyskane w próbie walcowania przed (a)(b) i po (c)(d) odkształceniu

Program FotoGrant2008 przewiduje ewentualność zaimportowania listy wszystkich punktów, przy zachowaniu układu przedstawionego w (3). Ta możliwość została wykorzystana przy automatycznej anotacji punktów.

5.3. Automatyczna anotacja punktów pomiarowych

Automatyczna anotacja punktów referencyjnych odbywa się przy wykorzystaniu programu napisanego w środowisku Matlab. Anotacja punktów pomiarowych jest przedmiotem publikacji [14], i nie będzie szerzej opisywana w tym artykule. Cały proces anotacji punktów podzielić można na kilka etapów:

- poszukiwanie okrągłych punktów,
- wyznaczenie współrzędnych środka odnalezionego punktu,
- rozpoznanie nazwy punktu,
- zapisanie punktu zgodnie z układem przedstawionym w (3).

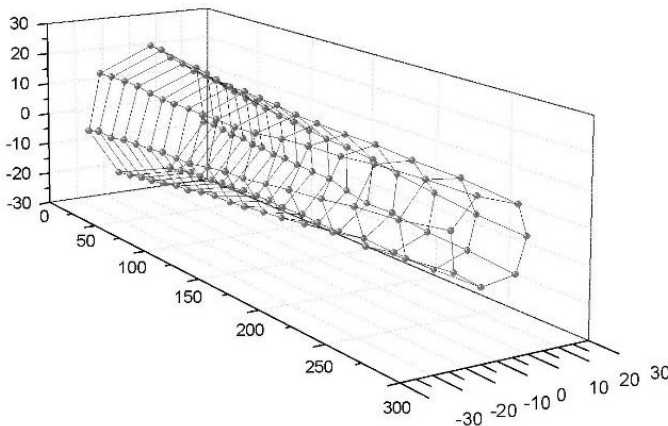
W pierwszej kolejności, wczytane kolorowe zdjęcie, konwertowane jest na zdjęcie binarne i usuwany jest szum. Następnie, przy użyciu funkcji „bwboundaries”, znajdowane są wszystkie regiony na zdjęciu, będące koloru białego. Oprócz punktów referencyjnych, które nas interesują, znajdowanych jest wiele innych. Aby je wyeliminować, sprawdzamy

owalność znalezionych regionów. Jeżeli dany region kwalifikuje się jako okrąg, współrzędne jego środka są zapisywane w tablicy.

Wszystkie punkty referencyjne ponumerowane są w zakresie od 0–99. Nazwa jest zawsze usytuowana poniżej punktu. Wykorzystując tę informację, program wyodrębnia region z nazwą i próbuje ją rozpoznać automatycznie. Do rozpoznawania wykorzystano wcześniej nauczoną sieć neuronową. Sieć posiada 35 neuronów w warstwie wejściowej, dwie warstwy ukryte i 10 neuronów w warstwie wyjściowej. Metoda uczenia sieci oparta jest na algorytmie wstecznej propagacji błędu z adaptacyjnym doбором współczynnika uczenia. Ciąg uczący składa się z 40 wzorców cyfr. Każda cyfra reprezentowana jest czterokrotnie. Do weryfikacji wykorzystano dodatkowy zbiór testowy, składający się z 10 znaków odpowiadających poszczególnym cyfrom. Sieć jest w stanie rozpoznać cyfry w zakresie 0–9. Dla liczb dwucyfrowych konieczny jest wcześniejszy preprocesing w celu rozdzielenia wszystkich cyfr danej liczby. Po rozpoznaniu punkty poddane są kategoryzacji na referencyjne bazowe i referencyjne dodatkowe. Po rozpoznaniu wszystkich punktów referencyjnych, wyniki zapisywane są do pliku tekstowego.

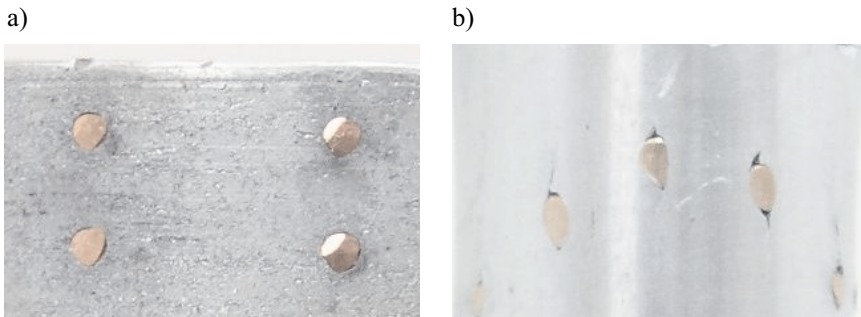
6. Rezultaty

Przykładowe wyniki, uzyskane z próby walcowania rury aluminiowej, na której umieszczono 126 punktów pomiarowych, pokazano na rysunku 10.



Rys. 10. Współrzędne punktów pomiarowych uzyskane z obliczeń

W trakcie walcowania sztyfty ulegają dużej deformacji (rys. 11), a kołowe węzły przyjmują kształt zbliżony do elipsy. Jako punkt pomiarowy należałoby przyjąć środek ciężkości przekroju tej elipsy. Ręczne oznaczenie środka ciężkości jest niemożliwe, dlatego w trakcie oznaczania punktów powstaje błąd [10, 11]. W przypadku automatycznej anotacji punktów oznaczanie środka ciężkości przeprowadzane jest automatycznie.



Rys. 11. Kształt punktów przed walcowaniem (a) i po walcowaniu (b)

Oszacowanie dokonane w tabeli 1 pokazuje, że czas potrzebny na opracowanie wyników z jednego pomiaru zakładając, że na rurze umieszczonych mamy 600 punktów pomiarowych, to ponad miesiąc. Ręczne oznaczanie punktów generuje również duży błąd, z powodów takich jak monotonność wykonywanego zadania, czy niemożliwość dokładnego oznaczenia środka ciężkości mocno zdeformowanego punktu [10]. Dlatego pojawia się konieczność opracowania systemu do automatycznej anotacji i numeracji punktów. Tylko takie rozwiązanie umożliwi przeprowadzenie prób walcowania szybko i dokładnie.

Tabela 1

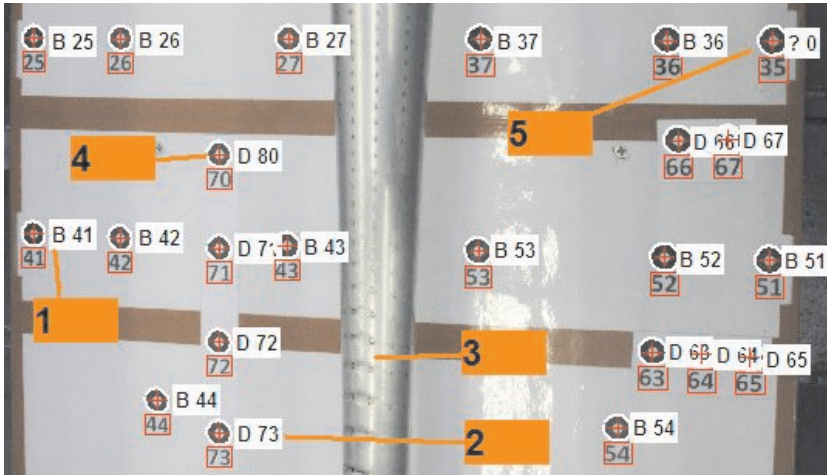
Kalkulacja liczby punktów referencyjnych niezbędnych do oznaczenia, czasu potrzebnego do opracowania wyników oraz liczba błędnych rozpoznań

Kolejne etapy fotografowania rury	Liczba punktów referencyjnych	Czas ręcznego oznaczania [min/h/dni]	Czas automatycznej anotacji [min/h]	Liczba błędnych rozpoznań
Pojedyncze zdjęcie	40	20 min	0,5 min	2
Para zdjęć stereofotogrametrycznych	× 2	40 min	1 min	4
Cała powierzchnia rury – obrót o 30° (12 × 30° = 360°)	× 12	8 h	12 min	48
8 serii zdjęć na każdy pomiar	× 8	64 h	96 min	384
Sumarycznie:	7680	8 dni*	1 h 36 min	192

* Zakładając 8-godzinny czas pracy.

Fragment obrazu pokazującego wyniki automatycznej anotacji punktów zaprezentowano na rysunku 12. Prawie wszystkie punkty referencyjne zostały odnalezione, ich nazwy również w większości są rozpoznane poprawnie. Uzyskano dużą dokładność oraz powtarzalność oznaczania środków ciężkości punktów. Nerozpoznany został punkt 35, błędnie rozpoznany jest również punkt 70. Aby uniknąć tego typu błędów, użytkownik programu

musi przeprowadzić weryfikację uzyskanych wyników i skorygować ewentualne błędy. Korekta jest możliwa bezpośrednio w programie Matlab – wystarczy kliknąć w biały obszar typu i nazwy punktu oraz wprowadzić poprawne wartości. Czas potrzebny do opracowania jednego zdjęcia nie przekracza 30 sekund. Jest to ogromny zysk czasu, w porównaniu z anotacją ręczną.



Rys. 12. Punkty referencyjne rozpoznane w Matlabie: 1 – poprawnie rozpoznany punkt referencyjny bazowy, 2 – poprawnie rozpoznany punkt referencyjny dodatkowy, 3 – rura z punktami pomiarowymi, 4 – błędnie rozpoznany punkt referencyjny, 5 – nierozpoznany punkt

7. Wnioski

Przygotowane stanowisko pomiarowe spełnia swoje zadanie w zakresie uzyskania obrazów wysokiej rozdzielczości, przeznaczonych do komputerowego przetwarzania obrazu. Ręczna anotacja punktów jest zadaniem czasochłonnym, dlatego opracowany został program przeznaczony do automatycznej anotacji punktów referencyjnych. Automatyczna anotacja punktów utrudniona była ze względu na odbłaski pojawiające się na planszy referencyjnej. Plansza pokryta jest przezroczystą folią, w celu uniknięcia zabrudzeń podczas walcowania. Aby wyeliminować odbłaski, stanowisko zostanie wyposażone w lampy dające światło spolaryzowane oraz w filtry polaryzacyjne. Program napisany w Matlabie działa poprawnie. Większość punktów referencyjnych jest odnajdywana, a sieć neuronowa poprawnie rozpoznaje prawie wszystkie ich nazwy. Zagadnienie związane z anotacją punktów pomiarowych zostało przedstawione w odrębnym opracowaniu [14]. Oba programy współpracują ze sobą tak, aby w jednym pliku wynikowym umieścić zarówno punkty referencyjne, jak i zweryfikowane przez użytkownika punkty pomiarowe.

Literatura

- [1] Boroń A., Tokarczyk R., *Badanie cyfrowych aparatów fotograficznych dla potrzeb fotogrametrii bliskiego zasięgu*. Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, vol. 10, 2000.
- [2] Karaś Ł., *Raport z pomiarów pływnięcia materiału w procesie walcowania pielgrzymowego przeprowadzonych w listopadzie 2008 r. w firmie Hutmen SA w ramach projektu PPP*. Praca niepublikowana.
- [3] Li Q., Guang G., Guanglun G., Yuan L., *CTOD measurement for cracks in concrete by fiber optic sensors*. Optics and Lasers in Engineering, 42, 2004, 377–388.
- [4] Lodej B., Niang K., Montmitonnet P., Aubin J.-L., *Accelerated 3D FEM computation of the mechanical history of the metal deformation in cold pilgering of tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 177, 2006, 188–191.
- [5] Montmitonnet P., Logé R., Hamery M., Chastea Y., Doudoux J.-L., Aubin J.-L., *3D elastic–plastic finite element simulation of cold pilgering of zircaloy tubes*. Journal of Materials Processing Technology, 125–126, 9, 2002, 814–820.
- [6] Morawiecki M., Sadok L., Wosiek E., *Przeróbka plastyczna, podstawy teoretyczne*. Śląsk, Katowice, 1986.
- [7] Mulot S., Hacquin A., Montmitonnet P., Aubin J.-L., *A fully 3D finite element simulation of cold pilgering*. Journal of Materials Processing Technology, 60, 1996, 505–512.
- [8] Osika J., *Nowa koncepcja procesu walcowania rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych*. Rudy i Metale Nieżelazne, nr 11, 2006, 629–634.
- [9] Osika J., *Walcowanie rur na zimno w walcarkach pielgrzymowych*. UWND AGH, Kraków, 2004.
- [10] Osika J., Palkowski H., Świątkowski K., Pocięcha D., Kula A., *Analysis of material deformation during the new cold tube rolling process realized on the new generation of pilger mills*. Archive of Metallurgy and Materials, vol. 54, 2009, 1239.
- [11] Osika J., Pocięcha D., Piwowarska M., *Stereofotogrametryczna metoda wyznaczania pól przemieszczeń w walcowaniu pielgrzymowym rur na zimno*. Rudy i Metale Nieżelazne, 3, 2010, 137.
- [12] Osika J., Świątkowski K., *An investigations of displacement and deformation during cold rolling of tubes in pilgering process*. 7th ICTP, Yokohama, Japan, Oct. 27 – Nov. 1, 2002.
- [13] Pietrzyk M., *Metody numeryczne w przeróbce plastycznej metali*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 1992.
- [14] Jabłoński M., Pocięcha D., *Automatyczna anotacja znaczników sztyftowych w procesie walcowania pielgrzymowego rur na zimno*. Automatyka (półrocznik AGH), t. 14, z. 3/1, 2010, 289–299.
- [15] Reves P., Kazimirov A., Bazarov I., *Optical measurement of thermal deformation of multilayer optics under synchrotron radiation*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 582, 2007, 142–145.
- [16] Szmelter J., *Metody komputerowe w mechanice*. PWN, Warszawa, 1980.
- [17] Xiao Z., Liang j., Yu D., Liu J., *Rapid three-dimension optical deformation measurement for transmission tower with different loads*. Optics and Lasers in Engineering, in press.
- [18] Zhang Z.Y., Richardson M.O.W., *Visualisation of barely visible impact damage in polymer matrix composites using an optical deformation and strain measurement system (ODSMS)*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, vol. 36, Issue 8, August 2005, 1073–1078.
- [19] <http://www.gom.com/EN/index.html>.
- [20] http://oen.dydaktyka.agh.edu.pl/dydaktyka/obliczenia_inzynierskie/a_fotogrametria/.