

walcowanie gwintów, gwinty o zarysie łukowym, zarys powierzchni czynnej walców, wcisk walcowania, modelowanie, MES, analiza numeryczna, warunki smarowania, jakość gwintu
thread rolling, thread with arched outline, outline of the active roll surface, the rolling interference, modelling, FEM, numerical analysis, lubrications condition, thread quality

Krzysztof KUKIEŁKA¹

NUMERYCZNE OKREŚLENIE WCISKU WALCOWANIA I WARUNKÓW SMAROWANIA W ASPEKTCIE JAKOŚCI GWINTU O ZARYSIE ŁUKOWYM O DUŻYM SKOKU WYKONYWANYM NA RURACH O DUŻEJ DŁUGOŚCI

Artykuł dotyczy nowoczesnej metodyki określania warunków walcowania gwintów łukowych o dużym skoku na rurach, również cienkościennych, wykorzystujących Metodę Elementu Skończonego (MES). Opracowana aplikacja WALCOWANIE GWINTÓW w systemie ANSYS/LS-DYNA pozwala na symulację zjawisk fizycznych towarzyszących procesowi obróbki. Przykładowo pokazano zastosowanie aplikacji do obliczenia wcisku i warunków smarowania w procesie walcowania gwintu specjalnego o zarysie łukowym (ang. round thread) o wymiarach $d = 32$ [mm], $P = 12,7$ [mm], stosowanych podczas wiercenia głębokich otworów w skałach metodą samowiercenia. Numerycznie określono stany przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w dowolnym miejscu gwintu podczas jego kształtowania i po procesie. Wyjaśniono przyczyny i warunki powstawania błędów zarysu gwintu. Dla zaprojektowanej czterorolkowej głowicy walcującej określono wcisk walcowania i warunki smarowania w aspekcie jakości gwintu. Przedstawiono przykładowe wyniki analiz numerycznych. Wyniki obliczeń numerycznych weryfikowano eksperymentalnie.

NUMERICAL DETERMINATION OF THE ROLL INTERFERENCE AND LUBRICATION CONDITIONS FOR ARCHED THREAD ROLLING WITH QUICK PITCH ON THE LONG PIPE

The aim of this article is concern to modern determination of rolling conditions for arched thread with quick pitch on the thin-walled pipes by means of Finite Element Methods. Developed in this article application WALCOWANIE GWINTÓW in the ANSYS/LS-DYNA system let for simulation of the physical phenomena accompanying during the working process. Exemplary, applying application for calculation of the rolling interference and lubrication conditions for round thread rolling with dimension $d = 32$ [mm], $P = 12,7$, applying for drilling hole in the rock by using self-drilling method were shown. Determination of state of displacement, strain and stresses in any place of the thread during and after rolling process were done numerically. Explanation of the causes of errors formation during the round thread rolling process like outline errors, deviation of shape and damage (crack) of the thread were shown. For designed axial rolling head with four rolls determination of the rolling interference and lubrication conditions in quality aspects of the screw were done. The work presented an example of the results of the numerical analysis.

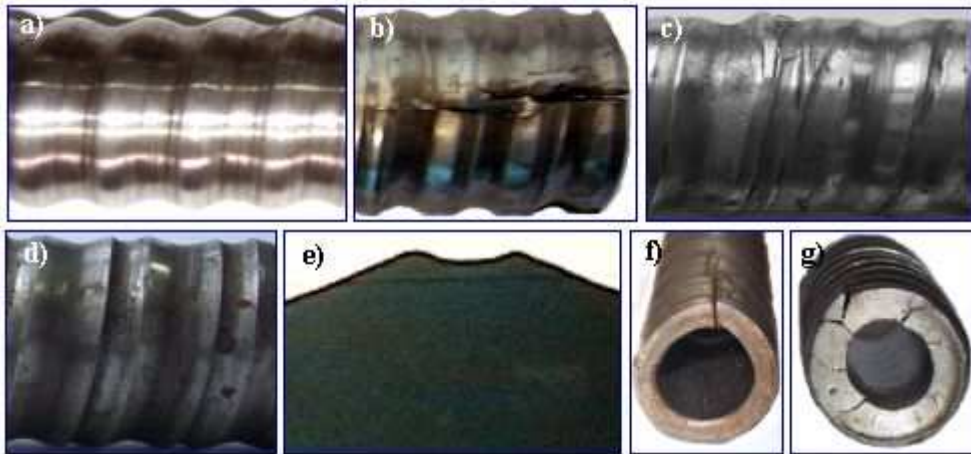
1. WSTĘP

W ostatnim piętnastolecu coraz szersze zastosowanie w procesach technologicznych znajdują metody obróbki polegające na plastycznym kształtowaniu metali na zimno. Wykorzystanie do tego celu odpowiedniej konstrukcji narzędzi pozwala na wykonywanie złożonych pod względem kształtu powierzchni: kół zębatych, wałków wielowypustowych i gwintów [1-3, 5-13, 17-25]. Szybki rozwój i coraz większy udział w procesach produkcyjnych metod plastycznego kształtowania metali na zimno nie zastąpi dotychczas stosowanych technologii obróbki skrawaniem, lecz stanowi ważne ich uzupełnienie.

Walcowanie jest jedną z metod obróbki plastycznej (kształtująco-wykańczającej), której istota polega na wykorzystaniu efektu powierzchniowych, miejscowych odkształceń plastycznych na zimno [1-3, 5-13, 17-25]. Ta nowoczesna metoda obróbki umożliwia uzyskanie wysokiej gładkości powierzchni przedmiotu ($R_a < 0,1$ μm) [19], a zarazem umocnienia mechanicznego warstwy wierzchniej [8, 18 i 19], natomiast przy zastosowaniu odpowiedniego oprzyrządowania – również zwiększenia dokładności wymiarowo-kształtowej [8, 18 i 19]. Poza tym stosowanie obróbki walcowaniem zmniejsza koszt produkcji części maszyn, ponieważ w jednej operacji możliwe jest uzyskanie wymaganego zarysu gwintu oraz ukształtowanie narzuconych z góry właściwości warstwy wierzchniej [8, 18, 19 i 25], a także zmniejsza się niekorzystne oddziaływanie na środowisko tradycyjnych, ubytkowych metod wytwarzania.

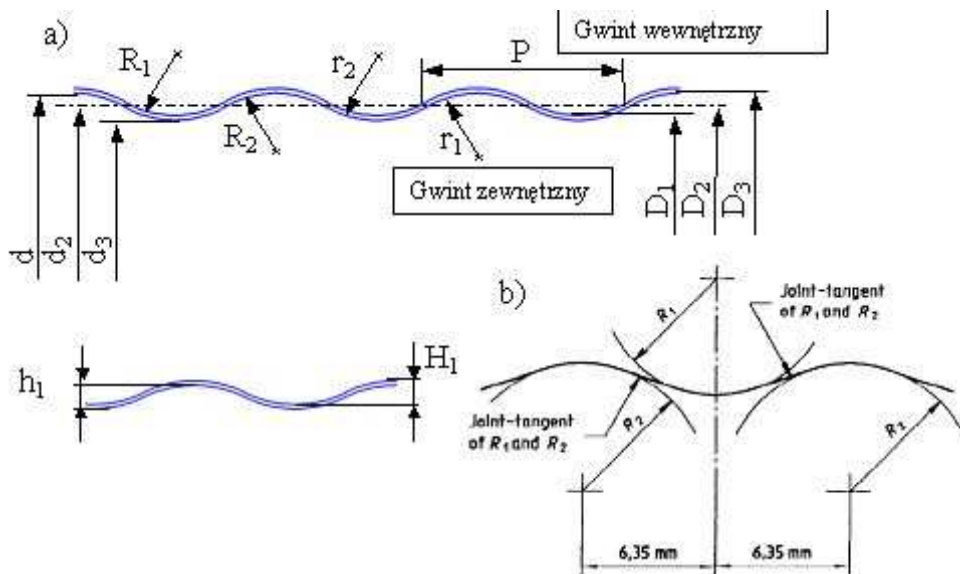
¹Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, 75-364 Koszalin, ul. Raławicka 15-17, tel. +48 94 3478 478

Zastosowanie walcowania gwintów na zimno na powierzchniach zewnętrznych rur cienkościennych jest problemem bardzo złożonym, gdyż w celu uzyskania wymaganego stanu odkształceń powierzchniowych, konieczne jest wywieranie dużych sił nacisku, które w przypadku małej sztywności postaciowej rury powodują jej uszkodzenie – łuszczenie, spłaszczenie, owalizację, skrzywienie, rozwarstwienie wzdłużne i/lub obwodowe oraz pęknięcie wzdłuż zgrzeiny (rys. 1).



Rys. 1. Poprawny gwint o zarysie łukowym (a) oraz przykładowe gwinty o zarysie łukowym z błędami powstałymi w wyniku walcowania gwintów: łuszczenie (b), nieregularny zarys (c), zawalcowywanie (d), niepełny zarys (e), owalizacja i pęknięcie (f), pęknięcia (g)

Częściowo wady te można wyeliminować stosując metodę walcowania z dodatkowym podgrzewaniem półwyrobu np. w piecu, płomieniem acetylenowo-tlenowym lub za pomocą prądu elektrycznego przepływającego przez pola powierzchni styku narzędzia z przedmiotem [14, 16]. Lokalny wzrost temperatury w strefie obróbki obniża granicę plastyczności materiału a zatem obniża również wartości sił nagięciowych. Stosowanie tych metod obróbki jest jednak droższe od walcowania na zimno.

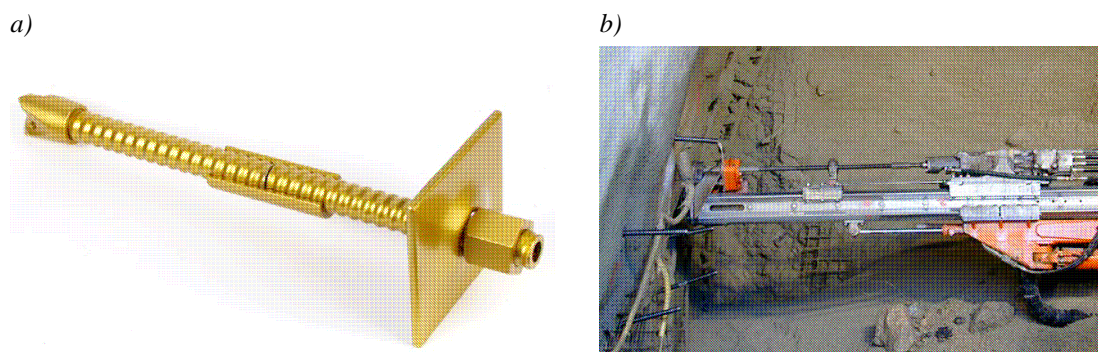


Rys. 2. Parametry geometryczne zarysu nominalnego gwintu łukowego walcowanego według normy ISO 10208:1991 [4](a): H_1 – wysokość gwintu wewnętrznego, h_1 – wysokość gwintu zewnętrznego, P – podziałka ($P=P_h$), D_1 – średnica zewnętrzna gwintu wewnętrznego, D_2 – średnica nominalna gwintu wewnętrznego, d_1 – średnica wewnętrzna gwintu wewnętrznego, d_2 – średnica nominalna gwintu zewnętrznego, d_3 – średnica wewnętrzna gwintu zewnętrznego, r_1 – promień zaokrąglenia wierzchołka gwintu zewnętrznego, r_2 – promień zaokrąglenia dna gwintu wewnętrznego, R_1 – promień zaokrąglenia dna gwintu wewnętrznego, R_2 – promień zaokrąglenia wierzchołka gwintu wewnętrznego; oraz schemat powstawania zarysu gwintów łukowych (b)

Specyficzną grupę stanowią gwinty o zarysie łukowym o dużym skoku (rys. 2, tab. 1). Połączenia z gwintem o zarysie łukowym, składające się z nakrętki i śruby wykorzystuje się głównie w wierceniu w skałach (rys. 3), można je również wykorzystać do budowy tuneli komunikacyjnych, w budownictwie do podpierania stropów i w pracach ziemnych do zabezpieczania wykopów. Najczęściej stosowane są śruby o typowych długościach $l = 6000$ [mm]. Natomiast wymaganą długość, dla danego zastosowania, uzyskuje się przez skrócenie śruby lub łączenie dwóch lub więcej odcinków śrub za pomocą specjalnych tulei gwintowanych.

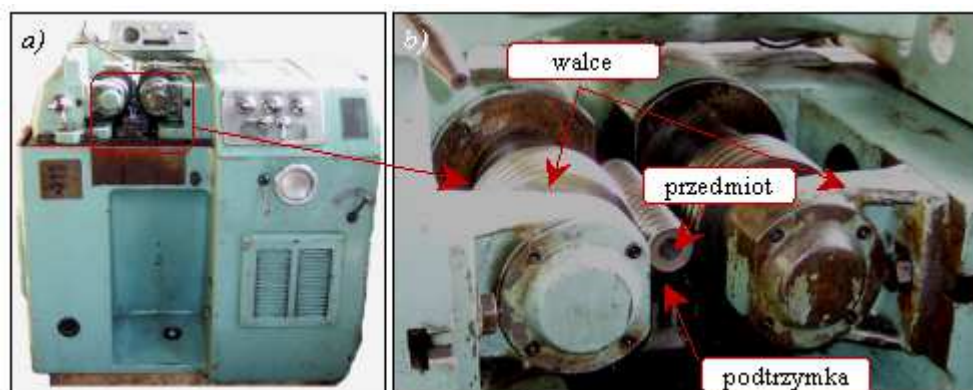
Tab. 1. Wymiary zarysu nominalnego gwintu łukowego walcowanego według normy ISO 10208:1991 [4]

Nominalna średnica gwintu	Gwint wewnętrzny				Gwint zewnętrzny				Skok P
	D_1 +0,25 0	H_1 +0,2 0	R_1 $\pm 0,4$	R_2 $\pm 0,4$	d 0 -0,2	h_1 +0,2 0	r_1 $\pm 0,4$	r_2 $\pm 0,4$	
22	18,86	1,5	5,5	6	21,84	1,5	5,5	6	12,7
25	21,76	1,5	5,5	6	24,74	1,5	5,5	6	12,7
28	24,95	1,5	5,5	6	27,95	1,5	5,5	6	12,7
32	28,36	1,5	5,5	6	31,34	1,5	5,5	6	12,7
38	35,01	1,5	5,5	6	37,99	1,5	5,5	6	12,7

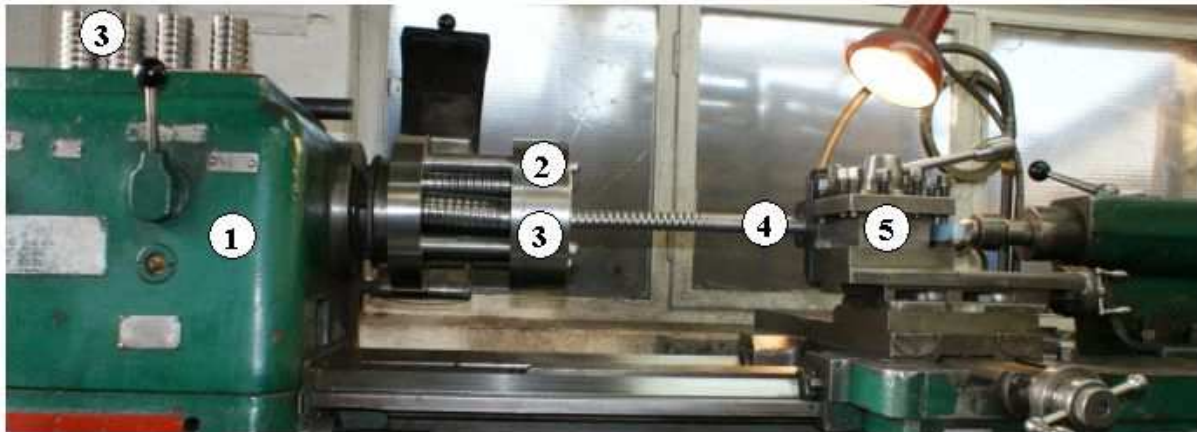


Rys. 3. Złożenie elementów systemu samo-wierzącego (a) oraz proces instalacji system w skale (b)

Przystosowanie typowych walcarek do gwintów z nieruchomą podtrzymałą, np. WGH 80 do walcowania gwintów na rurach o dużej długości (do 6 mb) jest niemożliwe ze względu na konstrukcję walcarki, która ogranicza zakres działania obrabiarki do walcowania gwintów o długości do 125 [mm] (rys. 4) [18, 19, 25]. Ponadto, proces walcowania odznacza się dużą niestabilnością, a obciążenie rury, o małej sztywności postaciowej, dużymi siłami obróbki powoduje, że otrzymanie śruby o wymaganej jakości jest zadaniem niezwykle złożonym. Powyższych wad nie posiada, zaproponowany w niniejszej pracy, nowy sposób walcowania bezkłowego przelotowego [8, 11, 12, 18 i 19] (rys. 5). Istotą tego rozwiązania jest wyeliminowanie nieruchomej podtrzymki i wprowadzenie układu zawierającego cztery rolki walcujące.



Rys. 4. Stanowisko do walcowania gwintów WGH 80 (a) oraz układ obróbkowy (b)



Rys. 5. Widok układu obróbkowego do walcowania gwintów o dużym skoku na długich rurach cienkościennych: 1 – tokarka konwencjonalna, 2 – głowica kątowa, 3 – rolki walcujące, 4 – przedmiot, 5 – uchwyt przedmiotu w imaku nożowym tokarki

Rozwiązanie takie uzyskujemy w obrotowej czterowalcowej głowicy kątowej zaprojektowanej w systemie Solid Works i wykonanej w Politechnice Koszalińskiej [26]. Głowica ta, jest przystosowana do konwencjonalnych tokarek uniwersalnych i jest mocowana w miejsce uchwytu tokarskiego. Konstrukcja głowicy pozwala na łatwą zmianę wcisku nagniatania oraz wymianę rolek walcujących (rys. 5). W tym przypadku walcowanie gwintów (obiekt rzeczywisty) (rys. 5) obejmuje przedmiot obrabiany wraz z głowicą (rolkami), otoczeniem i innymi oddziaływaniami zewnętrznymi. Proces rozpoczyna się od wprowadzenia półwyrobu do przestrzeni między cztery rolki głowicy. Dalej następuje kontakt półwyrobu z pierścieniami w strefie wprowadzającej rolki. W wyniku oddziaływania siłowego następuje obrót walców i ich stopniowe zagłębianie się w materiał przedmiotu, który wykonuje ruch posuwowy, z posuwem równym podziałce P gwintu walcowanego. Po dwóch obrotach głowicy następuje wyłączenie ruchu posuwowego wymuszonego mechanizmami tokarki konwencjonalnej i dalej przemieszczenie przedmiotu jest samoczynne wymuszone składową osiową siłą walcowania. W następnej fazie kolejne pierścienie walców kształtują zarys gwintu, następnie kalibrują zarys i wreszcie następuje stopniowe odciążenie przedmiotu w strefie wyjściowej walców. W strefę obróbki podawany jest czynnik chłodząco-smarujący. Cykliczny proces stopniowego obciążania, kształtowania zarysu, kalibrowania i odciążania powtarza się aż do uzyskania gwintu o wymaganej długości.

Z przeprowadzonej analizy literatury [1-3, 5-15, 17-21, 24-26], własnych badań eksperymentalnych [5-13] i symulacji komputerowych [1-3, 5-9, 11-13, 21, 24] wynika, że kształtowanie gwintu o wymaganej jakości technologicznej w procesie walcowania jest bardzo złożone, gdyż istotnie zależy ona od wielu czynników, które można podzielić na cztery grupy: czynniki materiałowe (moduł Younga E , współczynnik Poissona ν , początkowa granica plastyczności σ_0 , moduł umocnienia E_T , wrażliwość na prędkość odkształcenia n_2 , anizotropia plastyczna, wartość odkształcenia granicznego ϵ_f , zależność naprężenia uplastyczniającego od temperatury $\sigma_p(T)$, skłonność do kruchego pęknięcia), czynniki geometryczne gwintu i narzędzi (wymiary gwintu, grubość ścianki rury, stan powierzchni i stan fizyczny stref warstwy wierzchniej (stan naprężeń) rury po obróbkach poprzedzających, geometria walców, liczba i rozmieszczenie walców, rodzaj zarysu narzędzia (w kształcie linii śrubowej lub pierścieniowy), materiał i ustawienie podtrzymki, gwint jedno lub wielozwojowy), parametry technologiczne (zależne od typu walcarki lub głowicy specjalnej) (prędkość dosuwu walców, prędkość walcowania, siła docisku, moment i siły tarcia (rodzaj czynnika smarującego)) [25]. Dlatego też dla kompleksowej analizy procesu konieczne jest opracowanie adekwatnego modelu matematycznego i numerycznych metod jego rozwiązywania.

Natura i stopień skomplikowania zjawisk występujących w procesie walcowania gwintów powoduje, że najczęściej stosowaną metodą ich poznania są badania doświadczalne, realizowane zgodnie z planem eksperymentu [8, 30]. Takie podejście jest możliwe i opłacalne w przypadku produkcji masowej, w której wysokie koszty badań empirycznych rozkładają się na bardzo dużą liczbę wyprodukowanych egzemplarzy wyrobu.

Zastosowanie walcowania na zimno jest problemem bardzo złożonym, gdyż w celu uzyskania wymaganej jakości wyrobu oraz minimalizacji kosztów produkcji konieczne jest optymalne sterowanie procesem we wszystkich fazach jego realizacji. Natomiast niewłaściwy dobór warunków realizacji procesu jest przyczyną powstawania wielu wad. Rozwiązanie takiego problemu wymaga interdyscyplinarnej wiedzy z następujących dziedzin: podstaw mechaniki (nieliniowa mechanika ośrodków ciągłych, badania eksperymentalne), podstaw informatyki (komputery, sprzęt i urządzenia zewnętrzne, oprogramowanie specjalistyczne np. ANSYS), matematyki (rachunek wariacyjny i tensorowy) i metod numerycznych rozwiązywania problemów techniki (metoda elementów skończonych, analiza wrażliwości, algorytmy optymalizacyjne).

Proces walcowania gwintów łukowych na zimno rozpatrzono jako geometrycznie i fizycznie nieliniowe zagadnienie brzegowo-początkowe, w którym występują nieliniowe, ruchome oraz zmienne w czasie i przestrzeni warunki brzegowe. Przy czym warunki brzegowe w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem są nieznanne. Opracowano algorytm i aplikację w środowisku ANSYS, w języku APDL, do symulacji zjawisk fizycznych występujących w procesie walcowania. Symulacja numeryczna pozwala określać stany przemieszczeń, prędkości przemieszczeń, odkształceń, prędkości odkształceń i naprężeń w dowolnym miejscu deformowanego materiału oraz w dowolnej chwili walcowania, a zatem również przewidzieć przyczyny i warunki powstawania błędów zarysu i kształtu gwintu w trakcie całego wieloetapowego procesu walcowania.

Do najważniejszych możliwości analizy numerycznej w zastosowaniu do walcowania gwintów należą:

- określenie wymiarów wyjściowych rury (głównie średnicy zewnętrznej i minimalnej grubości ścianki),
- określenie geometrii i zarysu gwintu w czasie trwania procesu i po odciążeniu sprężystym,
- określenie stanów naprężeń i odkształceń lokalnych w gwincie,
- lokalizacja odkształceń maksymalnych – możliwość pęknięcia gwintu,
- określenie wymaganej siły walcowania,
- określenie liczby i geometrii walców, w tym zarysu powierzchni czynnej walców w strefie wejściowej, kształtującej, kalibrującej i wyjściowej,
- określenie wpływu współczynnika tarcia na przebieg procesu i jakość gwintu,
- określenie stanów obciążenia, naprężeń i odkształceń narzędzi,
- określenie obszarów kontaktu, poślizgu i przylegania.

W przypadku analizy proponowanego gwintu specjalnego $d = 32$ [mm] $P = 12,7$ [mm] podstawowym problemem jest określenie wymaganego wcisku walcowania oraz warunków smarowania ze względu na jakość gwintu. Zgodnie z normą ISO 10208 wymaga się, aby wymiar rzeczywisty wynosił $d = 31,34_{-0,2}^0$, a wysokość gwintu $h_1 = 1,5_0^{+0,2}$. Według zaleceń [8] średnica wyjściowa półwyrobu musi być określona z dużą dokładnością, czyli dla średnicy $d = 29,83$ wynosi 0,012 [mm], natomiast wcisk walcowania powinien być określony z dokładnością 0,01. Za mały wcisk walcowania powoduje, że zarys jest niepełny natomiast za duży wcisk powoduje gwałtowny wzrost sił walcowania i może doprowadzić do rozerwania głowicy. Określenie zarówno wcisku walcowania jak i warunków smarowania dla danego zarysu powierzchni czynnej walców jest zagadnieniem podstawowym.

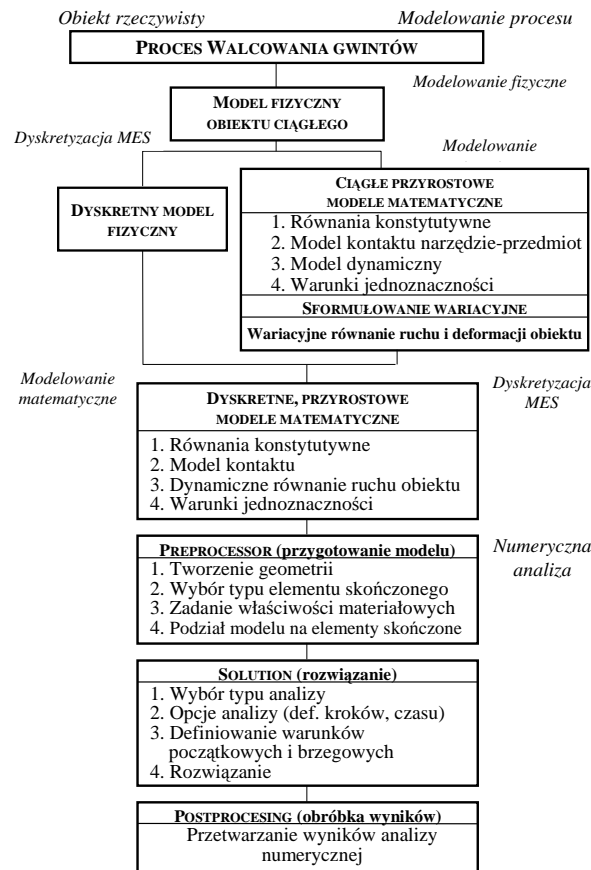
Celem głównym niniejszego artykułu jest opracowanie aplikacji numerycznej w systemie ANSYS/LS-DYNA z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej procesu i fizycznej materiału odkształcalnego oraz historii odkształceń, dla różnych materiałów gwintu, zarysu walców, warunków smarowania itp. Modelowanie matematyczne procesu oraz dyskretyzację otrzymanych równań wariacyjnych i rozwiązanie otrzymanych równań dyskretnych przeprowadzono zgodnie z algorytmem przedstawionym w pracach [8, 9, 13], przy założeniu, że proces walcowania na zimno jest procesem izotermicznym.

Celem dodatkowym pracy jest pokazanie możliwości zastosowania opracowanej aplikacji do analizy stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń lokalnych w kształtowanym gwincie o zarysie łukowym o dużym skoku oraz przewidywanie mechaniki płynięcia odkształcanego materiału w trakcie procesu a zatem wyjaśnienie przyczyn i warunków wytwarzania gwintów z błędami oraz określenie wymaganego wcisku walcowania i warunków smarowania. Poprawność obliczeń numerycznych zweryfikowano eksperymentalnie.

2. ALGORYTM MODELOWANIA I ANALIZY PROCESU WALCOWANIA GWINTÓW

Kompleksową analizę procesów walcowania gwintów przeprowadza się zgodnie z algorytmem przedstawionym na rysunku 6. Modelowanie procesu przy zastosowaniu metod wariacyjnych i elementów skończonych przebiega w następujących etapach:

1. Modelowanie fizyczne obiektu rzeczywistego w wyniku, czego uzyskuje się model fizyczny procesu walcowania gwintów (zbiór zjawisk i procesów, jakie występują w badanym obiekcie, zbiór założeń i uproszczeń).
2. Modelowanie matematyczne modelu fizycznego w wyniku, którego otrzymuje się ciągłe, przyrostowe modele matematyczne, to jest: równania konstytutywne, model kontaktu narzędzie walcujące – przedmiot, model dynamiczny i warunki jednoznaczności. W wyniku sformułowania wariacyjnego otrzymuje się ponadto dynamiczne równanie ruchu i deformacji obiektu. Alternatywą jest najpierw dyskretyzacja obiektu elementami skończonymi, w wyniku, której otrzymuje się dyskretny model fizyczny.
3. Aproksymacja ciągłego modelu matematycznego za pomocą metody elementów skończonych (MES) lub modelowanie matematyczne dyskretnego modelu fizycznego, prowadzące do dyskretnych, przyrostowych modeli matematycznych modelu fizycznego.
4. Przygotowanie modelu w systemie MES (PREPROCESSOR).
5. Rozwiązanie układu równań (SOLUTION).
6. Edycja wyników (POSTPROCESSING).



Rys. 6. Schemat modelowania i analizy procesu walcowania gwintów

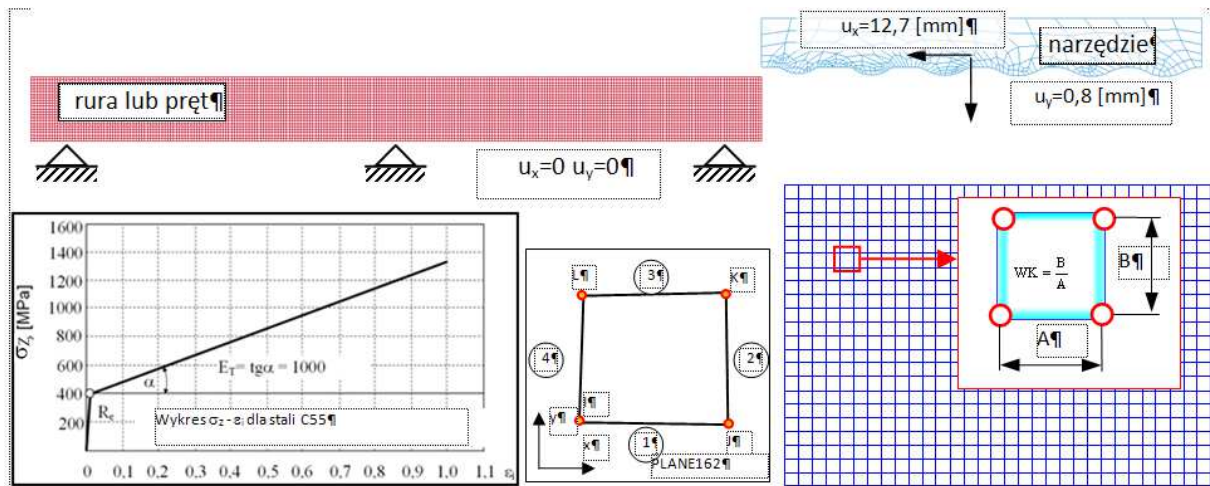
3. MODEL SYMULACYJNY PROCESU WALCOWANIA GWINTU

Modelowanie matematyczne procesu walcowania gwintów o zarysie łukowym opracowane zostało przy użyciu aplikacji ANSYS/LS-DYNA oraz według procedury szczegółowo opisanej w [8, 10, 15, 16, 29]. Opracowana aplikacja umożliwia kompleksową analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń występujących w trakcie jak i po procesie walcowania gwintów łukowych. Przykładowo analizą numeryczną objęto gwint o wymiarach $d = 32$ [mm], $P = 12,7$ [mm] (tab. 1). Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym [8, 26, 30]. Symulacje przeprowadzono dla płaskich stanów odkształceń i przestrzennych stanów naprężeń w materiale. Przedmiot dyskretyzowano elementami 4 węzłowymi typu PLANE 162. Współczynnik kształtu elementu skończonego WK zdefiniowano jako stosunek wysokości B do szerokości A elementu ($WK = B/A$), gdzie w rozpatrywanym przypadku przeprowadzona analiza wrażliwości układu na zmiany kształtu i liczby elementów skończonych, która wykazała, że najlepsze rezultaty otrzymuje się stosując siatkę regularną o kwadratowych polach (rys. 7). Z przeprowadzonej analizy wrażliwości stwierdzono, iż korzystna liczba elementów wynosi $LE=17640$ oraz liczba węzłów wynosi $LW=53317$. Obszar kontaktu zamodelowano za pomocą modułu SINGLE SURFACE – AUTO 2D. Na narzędzie nałożono wyjściowe przemieszczenie w kierunku u_y na głębokość obliczoną na

podstawie granicznych danych $d = 31,34_{-0,2}^0$, $d_3 = 28,34_{0}^{+0,2}$ z normy ISO 10208 ze wzoru $u_y = \frac{d-d_3}{4} = 0,75$

[mm], a następnie w kolejnych symulacjach zagłębienie zwiększano co 0,1 [mm] aż do uzyskania 90 % wypełnienia zarysu. Kolejne symulacje wykonano zwiększając zagłębienie co 0,05 [mm], aż do uzyskania 95 % wypełnienia zarysu. W każdej symulacji, dla ustalonego zagłębienia, narzędzie przesuwało w kierunku u_x , o skok równy podziałce, co oznacza, że obliczenia przebiegają w 18 krokach. Na spodzie modelu odebrano translacyjne oraz rotacyjne stopnie swobody dla węzłów.

W badaniach symulacyjnych przyjęto następujące wartości współczynników tarcia statycznego $\mu_s = 0; 0,1; 0,2; 0,3$ i 0,39 i dynamicznego $\mu_d = 0,009$. Do obliczeń numerycznych wykorzystano model materiałowy dla stali C55, które zamodelowano jako ciało sprężysto/lepko-plastyczne – model naprężeń uplastyczniających Cowpera-Symonds. W modelu wykorzystuje się warunek plastyczności Hubera-Misesa-Hencky'ego



Rys. 7. Model dyskretny do analizy walcowania gwintów zewnętrznych o zarysie łukowym

oraz stowarzyszone prawo płynięcia. Model Cowpera-Symonnda uwzględnia liniowo-izotropowe ($\beta = 1$), kinematyczne ($\beta = 0$) (przyjęte w symulacjach) lub mieszane ($0 < \beta < 1$) wzmocnienie plastyczne oraz wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego, według zależności potęgowej [27, 28]:

$$\sigma_p = \left[1 + \frac{\dot{\varphi}_i^{(p)}}{C} \right]^m (R_e + \beta \cdot E_p \cdot \varphi_i^{(p)}), \quad (1)$$

gdzie:

β – parametr umocnienia,

R_e – początkowa, statyczna granica plastyczności [MPa],

$\dot{\varphi}_i^{(p)}$ – intensywność prędkości odkształceń plastycznych [s⁻¹],

C – parametr materiałowy określający wpływ intensywności prędkości odkształcenia plastycznego [s⁻¹],

$m = \frac{1}{P}$ – stała materiałowa określająca wrażliwość materiału na prędkość odkształcenia plastycznego,

$\varphi_i^{(p)}$ – intensywność odkształcenia plastycznego,

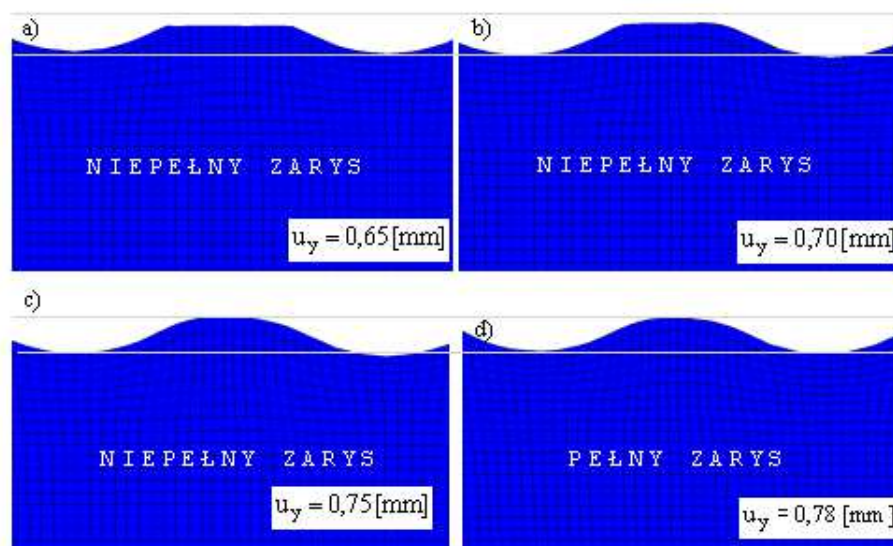
$E_p = \frac{E_T E}{E - E_T}$ – parametr materiałowy zależny od modułu umocnienia plastycznego $E_T = \partial \sigma_p / \partial \varphi_i^{(p)}$ i modułu sprężystości Younga E .

Celem analiz numerycznych jest określenie map przemieszczeń, odkształceń i naprężeń powstających podczas walcowania gwintów o zarysie łukowym dla różnego zagłębienia narzędzia w walcowany materiał oraz dla różnych warunków smarowania (współczynnika tarcia).

4. ANALIZA NUMERYCZNA PROCESU WALCOWANIA GWINTU O ZARYSIE ŁUKOWYM

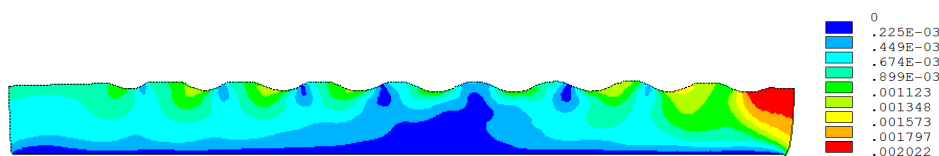
Pierwszym etapem badań symulacyjnych było określenie wpływu zagłębienia narzędzia na dokładność odwzorowania zarysu narzędzia. Badania symulacyjne rozpoczęto od głębokości $u_y = 0,65$ [mm]. W początkowej fazie zagłębiano narzędzie co 0,5 [mm] w kierunku y , w momencie otrzymania pełnego zarysu narzędzie zagłębiano co 0,01 [mm]. W efekcie określono, iż pełne zagłębienie narzędzia uzyskano dla zagłębienia $u_y = 0,78$ [mm]. W pozostałych przypadkach uzyskuje się niepełny zarys gwintu, który nie dyskwalifikuje uzyskanych śrub pod względem jakościowym. Przykładowe wyniki badań dla wcisku narzędzia przedstawiono na rysunku 8.

Dalszym etapem badań było określenie wpływu warunków smarowania na stany przemieszczeń i odkształceń i naprężeń w gwincie łukowym. Badania zrealizowano dla następujących wariantów współczynnika tarcia $\mu = 0, 0,1, 0,2, 0,3$ i 0,39.

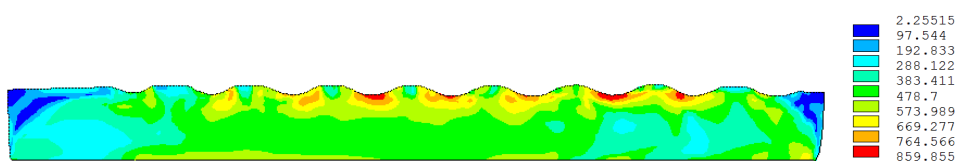


Rys. 8. Widok deformacji siatki elementów skończonych dla różnego stopnia zagłębienia narzędzia w walcowany materiał: a) 0,65 [mm], b) 0,7 [mm], c) 0,75 [mm] i d) 0,78 [mm] dla współczynnika tarcia $\mu=0$

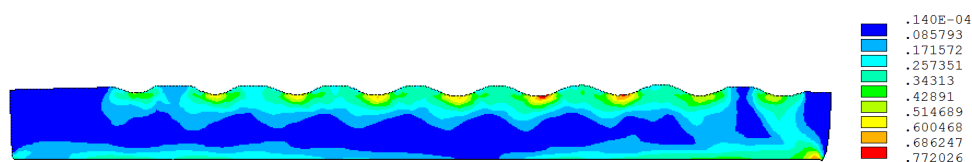
Przykładowe wyniki analizy numerycznej procesu walcowania gwintów łukowych dla współczynnika tarcia $\mu = 0; 0,2$ i $0,39$ przedstawiono na rysunkach 9-17, gdzie odpowiednio pokazano mapy przemieszczeń wypadkowych, naprężeń i odkształceń zastępczych, dla zagłębienia narzędzia $u_y = 0,78$ [mm].



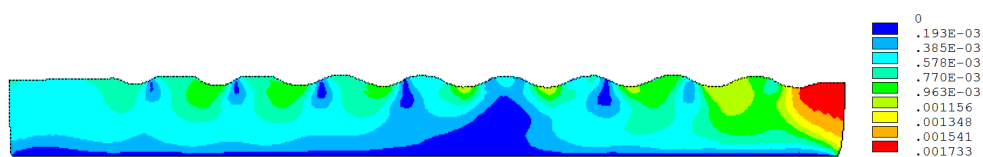
Rys. 9. Mapa przemieszczeń wypadkowych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0$



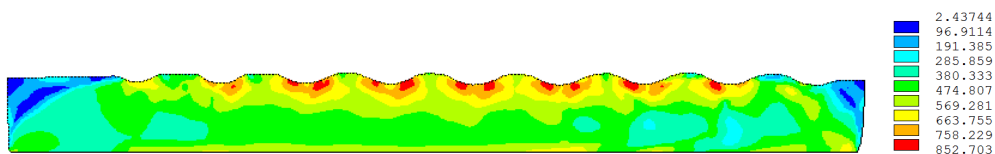
Rys. 10. Mapa naprężeń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych [MPa] dla $\mu=0$



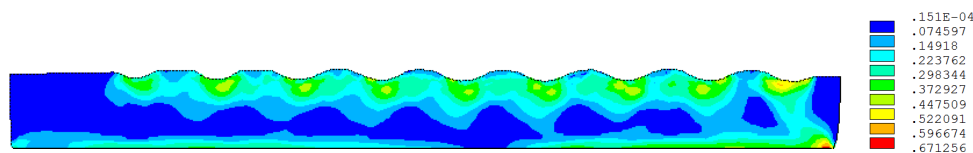
Rys. 11. Mapa odkształceń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0$



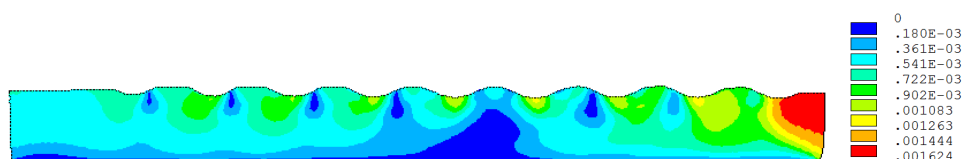
Rys. 12. Mapa przemieszczeń wypadkowych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0,2$



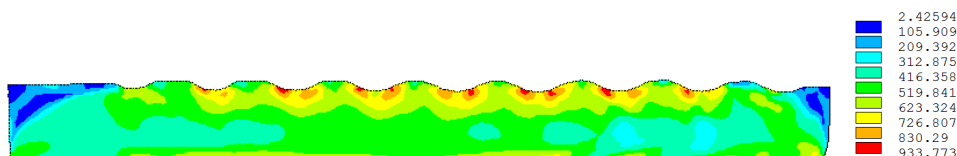
Rys. 13. Mapa naprężeń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych [MPa] dla $\mu=0,2$



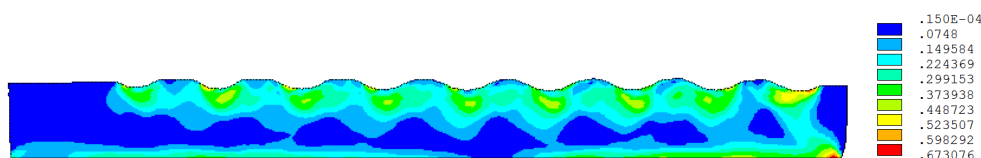
Rys. 14. Mapa odkształceń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0,2$



Rys. 15. Mapa przemieszczeń wypadkowych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0,39$

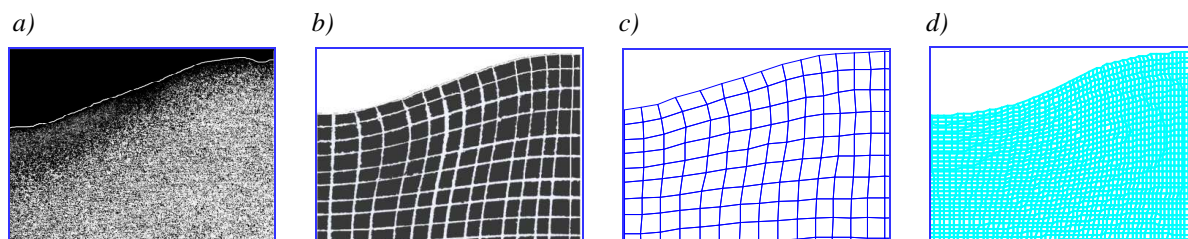


Rys. 16. Mapa naprężeń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych [MPa] dla $\mu=0,39$



Rys. 17. Mapa odkształceń zastępczych w walcowanych gwintach łukowych dla $\mu=0,39$

Na rysunku 18 przedstawiono porównanie zarysu rzeczywistego i deformacji ziaren (siatki) (rys. 18a) z wynikami otrzymanymi w badaniach modelowych z wykorzystaniem metody wizjoplastyczności (rys. 18b) oraz z wynikami analizy numerycznej według metody I (rys. 18c) i metody II (rys. 18d). Duża zgodność wyników pozwala stwierdzić, iż dyskretny model efektywny dla gwintów o zarysie łukowym jest opracowany poprawnie.



Rys. 18. Porównanie okrągłego zarysu gwintu rzeczywistego (a) z zarysem z badań modelowych (b), oraz z obliczeń numerycznych z wykorzystaniem I metody (c) i II metody (d) dla $\mu=0$

5. WNIOSKI

- 1) Walcowanie gwintów o zarysie łukowym na rurach jest złożonym procesem technologicznym. Wykorzystanie do tego celu typowych walcerek np. WGH 80 jest niemożliwe, ze względu na występujące błędy obróbki, zbyt małą prędkość walcowania, konieczność częstego przerywania procesu i zbyt małą długość walcowania. Błędy te można wyeliminować wprowadzając podtrzymkę obrotową w miejsce stałej, w postaci jednego lub dwóch dodatkowych walców. Konieczne jest zatem opracowanie konstrukcji specjalnej walcarki lub głowicy przystosowanej do tokarek konwencjonalnych.
- 2) W złożonych procesach obróbki plastycznej, w których materiał kształtowany ma więcej niż jeden stopień swobody, takich jak walcowanie gwintów, intuicja lub doświadczenie mogą okazać się niewystarczające w przewidywaniu mechaniki procesu. Symulacja numeryczna procesu jest w tym przypadku bardzo przydatnym i efektywnym narzędziem i może być wykorzystane do uzyskania szybkiej odpowiedzi na pytanie: **jak i gdzie płynnie odkształcony materiał w procesie walcowania ?**
- 3) Opracowana aplikacja WALCOWANIE GWINTÓW w systemie ANSYS/LS-DYNA pozwala na analizę zjawisk fizycznych zachodzących w procesie walcowania, w dowolnym miejscu obiektu i w dowolnej chwili trwania procesu dla różnych warunków realizacji procesu: materiał i wymiary półwyrobu, geometria rolek walcujących, parametry technologiczne, liczby rolek. W analizach numerycznych dla gwintu $d = 32$ [mm], $P = 12,7$ [mm] określono, iż wcisk walcowania powinien wynosić $u_y = 0,78$ mm, tak aby uzyskać pełny zarys gwintu. Za mały wcisk walcowania powoduje, że zarys jest niepełny natomiast za duży wcisk powoduje gwałtowny wzrost sił walcowania i może doprowadzić do uszkodzenia głowicy. Badania symulacyjne wpływu warunków smarowania podczas realizacji procesu wskazują jednoznacznie, iż zmiana współczynnika tarcia istotnie wpływa na mapy naprężeń, przemieszczeń i odkształceń zarówno w trakcie jak i po procesie walcowania.
- 4) Wyniki przeprowadzonych analiz numerycznych wykorzystano do projektowania rolek roboczych głowicy kątowej do walcowania gwintów łukowych na rurach. Dla nowych konstrukcji narzędzia przeprowadzono badania symulacyjne płynięcia materiału w trakcie obróbki i odwzorowania narzędzia w materiale obrabianym. Zatem dla zadanych warunków walcowania można prognozować jakość technologiczną gwintu lub odwrotnie dla wymaganej jakości technologicznej gwintów – określenie warunków walcowania.
- 5) Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że współczynnik tarcia ma istotny wpływ nie tylko na zarys gwintu, lecz także na stan odkształceń i naprężeń. Zatem współczynnik tarcia pośrednio wpływa również na jakość technologiczną i użytkową gwintu. Wyniki symulacji komputerowych mogą być podstawą doboru rodzaju czynnika chłodząco-smarującego w procesie walcowania.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Czarnecki H., Michalczyk H.: *Modelowanie i symulacja procesu wygniatania gwintów wewnętrznych na zimno*. Mechanik, nr 11/2014, Warszawa 2014, s. 13-24.
- [2] Domblesky J.P., Feng F.: *A parametric study of process parameters in external thread rolling*. Journal of Materials Processing Technology, Vol. 121, ELSEVIER, 2002, pp. 341÷349.
- [3] Domblesky J.P., Feng F.: *Two-dimensional and three-dimensional finite element models of external thread rolling*. Professional Engineering Publishing, Volume 216, No 4/2002, pp. 507÷517.
- [4] ISO 10208:1991 *International Standard - Rock drilling equipment – Left hand rope threads*. First edition 1991-02-15.
- [5] Kukielka K., Kukielka L.: *Modeling And Numerical Analysis Of The Thread Rolling Process*. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Volume 6, Issue 1, Weinheim, 2006, pp. 745-746.
- [6] Kukielka L., Kukielka K.: *Numerical analysis of the process of trapezoidal thread rolling*. High Performance Structures and Materials, ed. C.A. Brebbia, WITPRESS, Southampton, Boston, 2006, pp. 663-672.
- [7] Kukielka K., Kukielka L.: *Numerical analysis of the physical phenomena in the working zone in the rolling process of the round thread*. Computer Methods and Experimental Measurements for Surface Effect and Contact Mechanics VIII, eds. J.T.M de Hosson, C.A. Brebbia, S-I Nishida, WITPRESS, Southampton, Boston, 2007, pp. 125-124.
- [8] Kukielka K.: *Modelowanie i analiza numeryczna stanów deformacji i naprężeń w warstwie wierzchniej gwintów o zarysach trapezowym i łukowym walcowanych na zimno*. Rozprawa doktorska. Politechnika Koszalińska, Koszalin, 2009.
- [9] Kukielka K.: *Numerical simulations of deformation and stress in the cold rolled thread*. ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI, Tom 31, Nr 1, 2011, s. 57-66.
- [10] Kukielka K.: *Modelling the external thread rolling process using finite element method*. ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI Tom 31, Nr 3, 2011, s. 49-58.
- [11] Kukielka K.: *Numerical modelling of the strain and stress states in the thread with quick pitch in rolling process on cold*. Pomiar Automatyka Kontrola, nr 01/2012, 2012 s. 136-139.

- [12] Kukielka K., Kukielka L., Bohdal L., Kulakowska A., Malag L., Patyk R.: *3D Numerical Analysis the State of Elastic/Visco-Plastic Strain in the External Round Thread Rolled on Cold*. Applied Mechanics and Materials "Novel Trends in Production Devices and Systems" Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, 2014, USA-SLOVAKIA, p. 436-441.
- [13] Kukielka K.: *Efektywny model numeryczny do analizy procesu walcowania gwintów trapezowych metodą elementu skończonego*. Mechanik, nr 11/2014, Warszawa 2014, s. 13-24.
- [14] Kukielka L.: *Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating*. Book of Mechanical Engineering. Technical University of Koszalin, No 47, 1994, pp. 348.
- [15] Kukielka L., Kukielka K., Kulakowska A., Patyk R., Malag L., Bohdal L.: *Incremental Modelling and Numerical Solution of the Contact Problem between Movable Elastic and Elastic/Visco-Plastic Bodies and Application in the Technological Processes*. Applied Mechanics and Materials "Novel Trends in Production Devices and Systems" Editors: Karol Velišek, Peter Košťál and Milan Nad, 2014, USA-SLOVAKIA, p. 159-165.
- [16] Kukielka L., Geleta K., Kukielka K.: *Modelling of initial and boundary problems with geometrical and physical nonlinearity and its application in burnishing processes*. In Steel Research International, Special Edition, 14th International Conference on Metal Forming, 2012, pp. 1375-1378.
- [17] Kukielka L., Kukielka K.: *Nowoczesna metoda modelowania i analizy procesów technologicznych precyzyjnej obróbki części samochodowych*. Ekologiczne aspekty stosowania nowych technologii w transporcie. Monografia nr 235 Wydziału Mechanicznego, Politechniki Koszalińskiej, pod redakcją L. Kukielki, Koszalin 2012, ISSN 0239-7129, s. 109÷128.
- [18] Łyczko K.: *Technologia walcowania gwintów zewnętrznych*. WNT, Warszawa, 2010.
- [19] Olszak W.: *Obróbka skrawaniem*. WNT, Warszawa, 2008.
- [20] Pater Z., Gontarz A., Weroni W.: *New method of thread rolling*. Journal of Materials Processing Technology Volume 153–154, ELSEVIER, 2004, pp. 722÷728.
- [21] Pater Z., Gontarz A., Weroni W.: *Cross-wedge rolling by means of one flat wedge and two shaped rolls*. Journal of Materials Processing Technology, Volume 177, ELSEVIER, 2006, pp. 550-554.
- [22] Patyk R., Kukielka L.: *Projekt nowej metody sterowania rozkładem naprężeń własnych w procesie wielokrotnego hybrydowego nagniatania gładkościowo-umacniającego*. ARCHIWUM TECHNOLOGII MASZYN I AUTOMATYZACJI Tom 30 Nr 1, 2010, s. 143-150.
- [23] Szczepanik K., Kukielka L., Patyk R., Kukielka K.: *Symulacja numeryczna zjawisk fizycznych podczas nagniatania tocznego w procesie regeneracji części maszyn rolniczych*. INŻYNIERIA ROLNICZA, Tom 5, Nr 130, 2011, s. 283-290.
- [24] Żońnik P., Pater Z.: *Analiza numeryczna procesu walcowania poprzecznego gwintu śruby M20x2, 5 metodą styczną*. Obróbka Plastyczna Metali 21, 2010, s. 155-167.
- [25] Żurawski Z., Sikora J., Błużek J.: *Walcowanie gwintów*. WNT, Warszawa, 1962.
- [26] Kukielka K., Kukielka L.: *Głowica do walcowania gwintów zewnętrznych*. Patent nr P 402652, z dn. 4.02.2013.
- [27] ANSYS LS – DYNA User's Guide.
- [28] Choromańska M., Kukielka K., Kurcek R., Forsiewicz M.: *Nowoczesne metody symulacyjne wspomagające proces doboru narzędzi ściernych do obróbki części samochodowych*. AUTOBUSY. TECHNIKA, EKSPLOATACJA, SYSTEMY TRANSPORTOWE Nr 5, 2012, s. 129-136.
- [29] Kukielka L., Kukielka K.: *Modelling and analysis of the technological processes using finite element method (w niniejszym czasopiśmie)*.
- [30] Kukielka L.: *Podstawy badań inżynierskich*. PWN, Warsaw, 2002.