

nagniatanie, zgniatanie, warstwa wierzchnia, SGP, powierzchnia chropowata, regularne nierówności trójkątne, MES, analiza numeryczna, stan naprężeń, odkształceń, przemieszczeń
 burnishing rolling, squeezing process, surface layer, geometric structure of the surface, rough surface, regular triangular inequality, FEM, numerical analysis, state of stress, state of strain, state of displacement

Leon KUKIEŁKA¹
 Michał SZCZEŚNIAK²

WPLYW KĄTA WIERZCHOŁKOWEGO REGULARNEJ NIERÓWNOŚCI TRÓJKĄTNEJ POWIERZCHNI WYJŚCIOWEJ NA CHROPOWATOŚĆ POWIERZCHNI WYROBU PO PROCESIE ZGNIATANIA

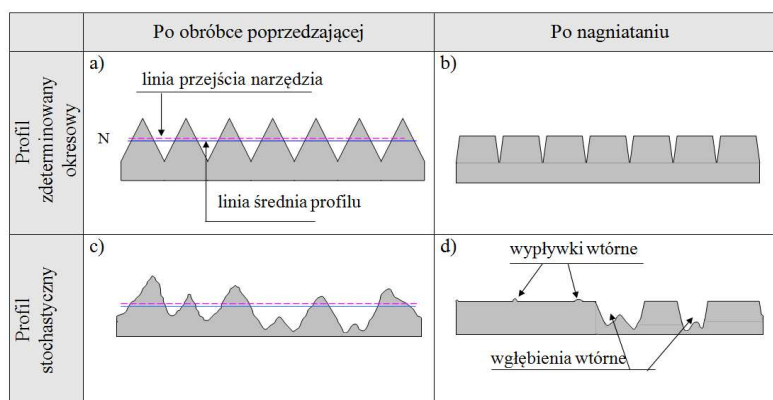
Artykuł dotyczy możliwości analizy metodami numerycznymi (MES) zjawisk fizycznych zachodzących w procesie zgniatania nierówności. Opracowano aplikację w programie ANSYS, która pozwala analizować zjawiska fizyczne zachodzące podczas procesu zgniatania regularnych nierówności trójkątnych, z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Walidację aplikacji dokonano badając podnoszenie się dna regularnej nierówności trójkątnej poprzez porównanie wyników symulacji z istniejącymi wynikami badań eksperymentalnych. Pokazano możliwość zastosowania opracowanej aplikacji do określania stanu naprężeń i odkształceń w procesie zgniatania regularnych nierówności trójkątnych.

INFLUENCE OF THE APEX ANGLE OF TRIANGULAR ASPERITIES OF SURFACES AFTER PREVIOUS TREATMENT ON THE ROUGHNESS OF THE SURFACE AFTER SQUEEZING PROCESS

The article concerns the possibility of analysis by numerical methods (FEM) physical phenomena occurring in the inequality squeezing process. Developed in ANSYS application that allows to analyze the physical phenomena occurring during the squeezing process of the regular triangular inequality, taking into account the physical and geometric nonlinearity. Validation of the application was made by examining the rise of the bottom of a regular triangular inequality by comparing simulation results with existing experimental results. Possibility of the developed application to determine the state of stress and strain in the process of squeezing the regular triangle inequality were presented.

1. WSTĘP

W celu uzyskania, po nagniataniu wyrobu o wysokiej jakości powierzchni, która w zależności od przeznaczenia części posiada bądź profil zdeterminowany o płasko wierzchołkowych nierównościach tzw. zarys plateau (stosowane w węzłach tribologicznych), bądź posiada bardzo gładką powierzchnię o dużym udziale nośnym materiałowym (tłoczyska siłowników, uszczelnienia, połączenia wciskowe, itp.) wymagane jest, aby w obróbce



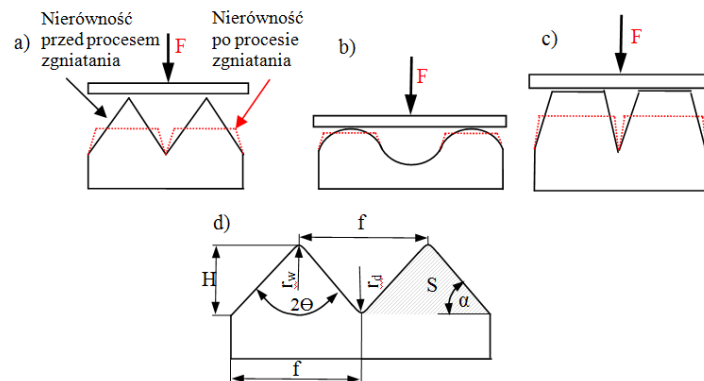
Rys. 1. Przykładowe profile chropowatości po obróbce poprzedzającej i po nagniataniu [1]

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, ul. Raclawicka 15-17 e-mail: leon.kukielka@tu.koszalin.pl

² Politechnika Koszalińska, Wydział Mechaniczny, ul. Raclawicka 15-17 e-mail: michalszczesniak@live.com

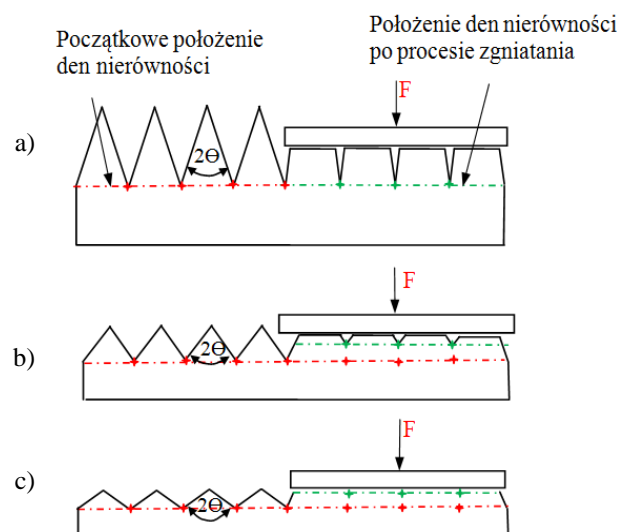
poprzedzającej ukształtować strukturę geometryczną powierzchni o zdefiniowanym, okresowym profilu chropowatości [1÷5] (rys. 1a). Nagniatanie powierzchni o stochastycznym profilu chropowatości (np. po szlifowaniu) powoduje, że po nagniataniu uzyskuje się również powierzchnię o stochastycznym profilu chropowatości. Na powierzchni powstają wtórne wgłębienia i wypłytki, co powoduje pogorszenie jakości powierzchni nagniatanej (rys. 1b) [1].

Profil zdefiniowany może mieć różny zarys np. trójkątny, łukowy, prostokątny lub trapezowy. Zarys nierówności może mieć decydujący wpływ na przebieg procesu deformacji (przemieszczenie, odkształcenie) oraz na stan naprężeń i wygładzenie powierzchni po procesie nagniatania (zgniatania) (rys. 2) [1].



Rys. 2. Przykładowe profile zdefiniowane powierzchni a) profil łukowy, b) profil trapezowy, c) profil trójkątny [1], d) parametry geometryczne symetrycznej nierówności trójkątnej

Z dotychczasowych badań wynika, że chropowatość powierzchni po procesie zgniatania regularnych nierówności trójkątnych zależy między innymi od rodzaju materiału nierówności (granicy plastyczności R_e , modułu umocnienia E_T), od wielkości geometrycznych (kąt wierzchołkowy nierówności 2θ , odstęp f , objętość V (lub pole powierzchni zarysu S), zaokrąglenie dna r_d oraz wierzchołka r_w nierówności (rys. 4d)). Kukielka L. [1, 2] podaje trzy jakościowo różne przypadki deformacji trójkątnej nierówności powierzchni w procesie nagniatania, zależne od kąta wierzchołkowego nierówności po obróbkach poprzedzających. W pierwszym przypadku, gdy $2\theta \leq 80^\circ$ (rys. 3a), dno nierówności nie podnosi się, na powierzchni powstają wgłębienia wtórne a odkształcenia plastyczne zachodzą w zakresie wysokości nierówności. W drugim przypadku, gdy $80^\circ < 2\theta < 145^\circ$ (rys. 3b), następuje częściowe podnoszenie się dna nierówności a na powierzchni powstają również wgłębienia wtórne, zaś zakres odkształceń plastycznych jest większy od wysokości nierówności. Natomiast w trzecim wypadku $2\theta \geq 145^\circ$ (rys. 3c), następuje całkowite podniesienie się dna nierówności, czyli zachodzi największe wygładzenie nierówności.



Rys. 3. Wpływ kąta wierzchołkowego symetrycznej nierówności trójkątnej na profil chropowatości powierzchni i położenie wgłębienia wtórnego po nagniataniu [2]: a) $2\theta \leq 80^\circ$, b) $80^\circ < 2\theta < 145^\circ$, c) $2\theta \geq 145^\circ$

Aktualnie brak jest jednak wyjaśnienia wpływu parametrów profilu zdeterminowanego na przebieg zjawisk fizycznych w procesie zgniatania, które mają bezpośredni wpływ na jakość kształtowanej warstwy wierzchniej wyrobu, a więc i na właściwości tribologiczne i zmęczeniowe wyrobu po procesie. W szczególności, mimo licznych publikacji, nie ma jednoznacznych wytycznych pozwalających na świadomy dobór parametrów zarysu regularnych nierówności trójkątnych (kąta wierzchołkowy 2θ , wysokość H , kąty pochylenia boków α , długość podstawy f) powierzchni wyjściowej pod nagniatanie [7, 8]. W dotychczasowych badaniach nie uwzględniono również wpływu takich parametrów jak: objętość (pole powierzchni zarysu), wysokość, odstęp itp. co może istotnie wpłynąć na jakość powierzchni po procesie zgniatania regularnych nierówności trójkątnych. Ponadto w procesie zgniatania występuje wiele zjawisk fizycznych, których obserwacja lub pomiar jest bardzo trudny lub niemożliwy. Należą do nich np. zjawiska zachodzące w obszarach kontaktu narzędzia z przedmiotem - naciski, siły tarcia, obszary przylegania i poślizgu, stany przemieszczeń, odkształceń i naprężeń.

Celem artykułu jest opracowanie efektywnego modelu numerycznego bazującego na metodzie elementów skończonych, który pozwoli na analizę tych zjawisk w dowolnym punkcie przedmiotu oraz w dowolnej chwili trwania procesu z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej. Celem szczegółowym jest wyjaśnienie wpływu kąta wierzchołkowego 2θ (kąta pochylenia boków $\alpha = (180^\circ - 2\theta)/2$) symetrycznej nierówności trójkątnej na przebieg procesu deformacji oraz na stany przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w WW przedmiotu w procesie zgniatania. Zgniatanie regularnych nierówności trójkątnych jest procesem podstawowym, który może mieć zastosowanie w różnych etapach procesu technologicznego. Odpowiedni dobór parametrów zgniatanych regularnych nierówności trójkątnych pozwoli na świadome sterowanie procesem [1]. Pozwoli to na przykład, dla zadanej geometrii nierówności wyjściowej i głębokości zgniatania określić zarys nierówności powierzchni wyrobu po procesie oraz stan odkształceń i naprężeń w WW lub na odwrót dla wymaganych własności WW wyrobu określić wymagane parametry zarysu powierzchni po obróbce poprzedzającej i głębokość nagniatania. Są to podstawowe zagadnienia niezbędne przy projektowaniu procesu technologicznego obróbki wykorzystującej zgniot powierzchniowy powierzchni chropowatej.

2. MODEL SYMULACYJNY PROCESU ZGNIATANIA NIERÓWNOŚCI

Powszechne stosowanie wzorów empirycznych do opisu procesów technologicznych nie może być zastosowane do analizy występujących w tych procesach zjawisk fizycznych ze względu na trudności pomiaru wielkości wyjściowych w trakcie trwania eksperymentu oraz ze względu na to, że otrzymane na podstawie planowanych badań [10], równania regresji obowiązują dla identycznych jak podczas badań warunków obróbki. Stąd też niemożliwe jest uogólnianie wyników badań na inne obszary zmienności czynników.

Symulacja numeryczna jest cennym narzędziem pozwalającym na poznanie zjawisk, których badanie eksperymentalne jest trudne lub niemożliwe. Są to głównie zjawiska występujące w niezwykle małych obszarach, przebiegające z wysokimi prędkościami, trwające bardzo krótko a decydujące o wynikach procesu skrawania. Do problemów takich należą w szczególności: tarcie, przyleganie i poślizg, przemieszczenia, odkształcenia, naprężenia i temperatura przedmiotu obrabianego, zmienność właściwości materiału obrabianego, pękanie materiału. Analiza numeryczna pozwala również na określenie wpływu na jakość technologiczną wyrobu: rodzaju materiału i jego stanu, geometrii narzędzi, wpływu warunków procesu technologicznego na stan odkształceń, naprężeń i temperatur w przedmiocie, kształt wyływek i jakości powierzchni obrobionej.

Do symulacji procesu zgniatania wykorzystano autorskie aplikacje opracowane w programie ANSYS/LS-Dyna w języku APDL. Modelowanie matematyczne procesu zgniatania opracowane zostało przy użyciu Solvera LS-DYNA według procedury szczegółowo opisanej w [9].

W rozważaniach pominięto wpływ temperatury, traktując że proces zgniatania jest realizowany w temperaturze otoczenia – proces izotermiczny oraz wpływ odchyłek wysokości ΔH i odstępu Δf nierówności.

Proces zgniatania traktowano jako geometrycznie i fizycznie nieliniowe zagadnienie brzegowo-początkowe z nieznanymi warunkami brzegowymi w obszarze kontaktu.

Do opisu zjawisk fizycznych, występujących podczas realizacji tych procesów, zastosowano uaktualniony opis Lagrange'a [10], stosując adekwatne miary przyrostów odkształceń i naprężeń, odpowiednio przyrost tensora odkształceń Greena-Lagrange'a oraz przyrost tensora naprężeń Pioli-Kirchhoff'a [11]. Materiał przedmiotu modelowano jako ciało sprężysto/lepkoplastyczne z umocnieniem (Bilinear Kinematic), natomiast stempel traktowano jako ciało sztywne (Rigid). W tabeli 1 przedstawiono parametry materiałowe dla przedmiotu oraz dla stempla.

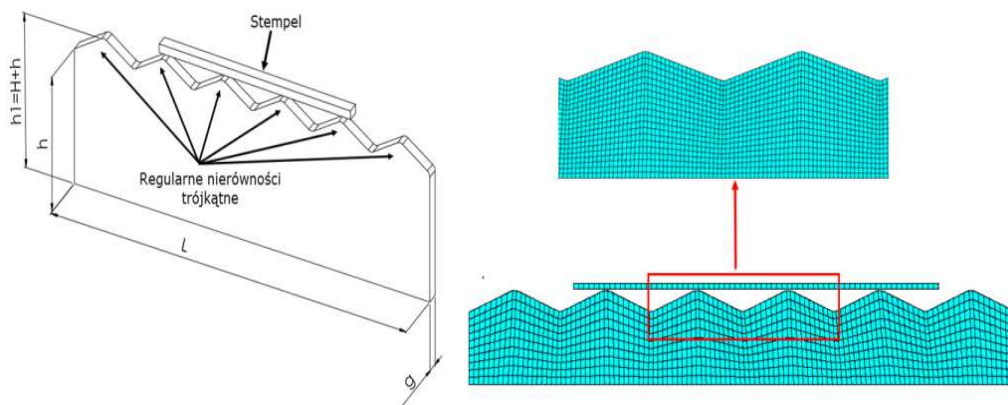
Schemat procesu został przedstawiony na rysunku 4a, natomiast na rysunku 4b zaprezentowano regularne nierówności trójkątne po dyskretyzacji.

Badania numeryczne zrealizowano zgodnie z warunkami początkowo-brzegowymi, odwzorowującymi badania na stanowisku eksperymentalnym (rys. 4a). Symulacje przeprowadzono dla przestrzennych stanów naprężeń i przestrzennym stanów odkształceń. Analizą objęto próbki wykonane ze stali S235JR, o wymiarach: grubość $g = 0,65$ [mm], szerokość $l = 10,5$ [mm], wysokość $l = 2$ [mm], natomiast wysokość nierówności H

Tab. 1. Parametry materiałowe

Bilinear Kinematic (model materiału przedmiotu obrabianego)				
Gęstość ρ [kg·m ⁻³]	Moduł Younga E [GPa]	Współczynnik Poissona ν [—]	Granica plastyczności Re [MPa]	Moduł umocnienia E _T [MPa]
7900	210	0,3	290	520
Rigid (stempel)				
Gęstość ρ [kg·m ⁻³]	Moduł Younga E [GPa]	Współczynnik Poissona ν [—]	Granica plastyczności Re [MPa]	Moduł umocnienia E _T [MPa]
7900	210	0,3	—	—

była zmieniana wraz ze zmianą kąta 2θ (tab. 2). Odebrano translacyjne oraz rotacyjne stopnie swobody na dnie przedmiotu oraz odebrano translacyjne stopnie swobody dla przemieszczeń UY dla ścian bocznych próbki i UZ dla ściany przedniej i tylnej. Przedmiot i stempel dyskretyzowano cztero-węzłowymi elementami skończonymi typu Solid 164. W rozpatrywanym przypadku przeprowadzona analiza wrażliwości układu na zmiany kształtu i liczby elementów skończonych wykazała, że najlepsze rezultaty otrzymuje się stosując siatkę regularną o polach kwadratowych lub prostokątnych.



Rys. 4. Schemat procesu zgniatania regularnych nierówności trójkątnych (a) oraz widok modelu po dyskretyzacji (b)

Tab. 2. Parametry zarysu regularnych nierówności trójkątnych

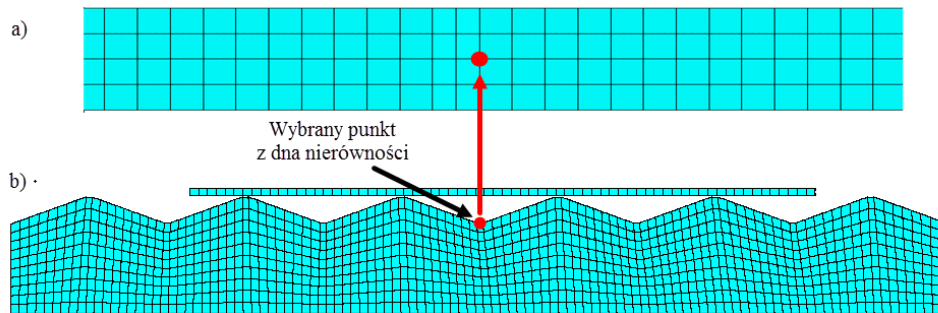
Kąt 2θ [°]	H [mm]	f [mm]	$r_d=r_w$ [mm]
150	0,233	1,75	0,05
140	0,315	1,75	0,05
120	1,432	1,75	0,05
90	1,831	1,75	0,05

Optymalna liczba elementów skończonych wgniatanego elementu wynosiła 80000 (rys. 6). Obszar kontaktu zamodelowano za pomocą modułu SURFACE TO SURFACE – AUTOMATIC. W symulacjach przyjęto stałe współczynniki tarcia statycznego $\mu_s = 0,08$ i kinetycznego $\mu_d = 0,009$. Wartości te przyjęto jako stałe dla każdej symulacji. Natomiast zamieniano wartości kątów wierzchołkowych $2\theta = 150^\circ, 140^\circ, 120^\circ$ i 90° uzyskując w ten sposób różne warianty jego geometrii. W tabeli 2 przedstawiono wielkości parametry geometryczne nierówności dla poszczególnych kątów wierzchołkowych 2θ . Nierówności zgniatano statycznie płaskim stemplem, którego przemieszczenie wynosiło od 0 do g_{max} [mm], gdzie $g_{max} = 0,046$ dla $2\theta = 150^\circ$, $g_{max} = 0,157$ dla $2\theta = 140^\circ$, $g_{max} = 0,716$ dla $2\theta = 120^\circ$ oraz $g_{max} = 0,915$ dla $2\theta = 90^\circ$.

3. WYNIKI SYMULACJI NUMERYCZNEJ

Badania symulacyjne przeprowadzono w dwóch etapach. Etap pierwszy dotyczył walidacji opracowanych autorskich aplikacji w programie ANSYS/LS-Dyna, czyli sprawdzenia poprawności przyjętych modeli, dyskretyzacji, działania systemu komputerowego oraz słuszności zaimplementowanych algorytmów, poprzez porównanie rozwiązania komputerowego z wynikami badań eksperymentalnych. W tym celu numerycznie określono wartości przemieszczeń dna nierówności o różnych kątach wierzchołkowych i porównano z wynikami eksperymentu [1]. W etapie drugim obliczono stany odkształceń i naprężeń w warstwie wierzchniej po procesie zgniatania nierówności.

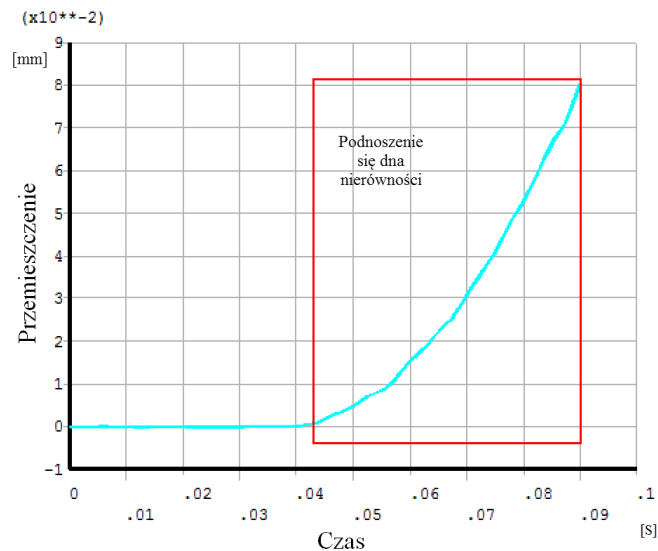
W celu określenia przemieszczenia dna nierówności wybrano jeden punkt węzłowy nierówności (rys. 5) oraz obliczono jego przemieszczenie wzdłuż osi Y, w czasie procesu zgniatania nierówności, dla poszczególnych kątów wierzchołkowych 2θ .



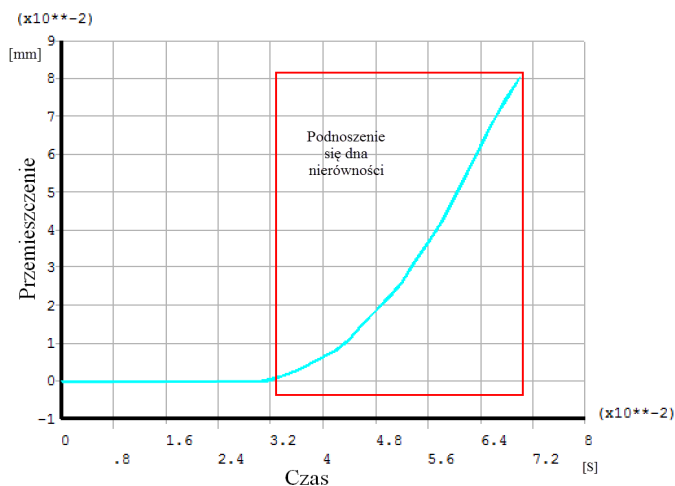
Rys. 5. Wybrany punkt węzłowy z dna nierówności; widok próbki z góry (a) i czółowy (b)

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono przemieszczanie się wybranego punktu węzłowego w wyniku zgniatania nierówności o kątach wierzchołkowych $2\theta = 150^\circ$ i $2\theta = 140^\circ$.

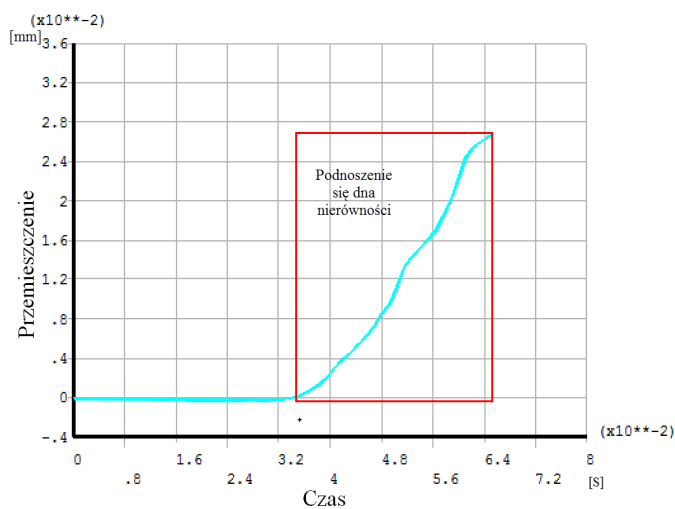
Na rysunkach 8 i 9 pokazano przemieszczanie się wybranego punktu węzłowego wyniku zgniatania nierówności o kątach wierzchołkowych $2\theta = 120^\circ$ i $2\theta = 90^\circ$.



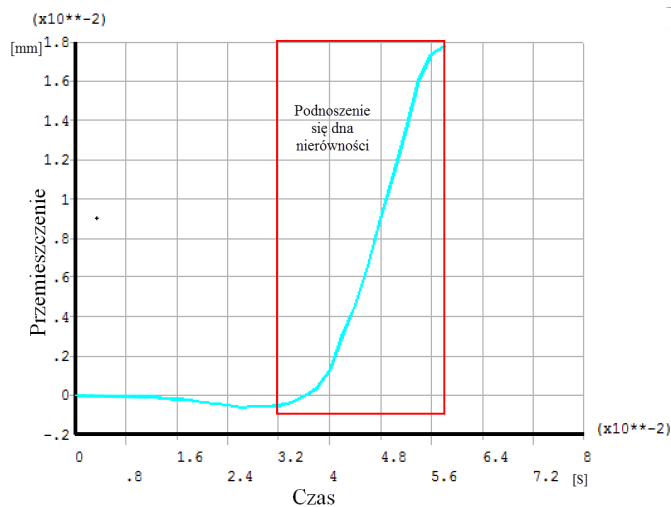
Rys. 6. Przemieszczenie się wybranego punktu węzłowego w osi Y podczas procesu zgniatania nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 150^\circ$



Rys. 7. Przemieszczenie się wybranego punktu węzłowego w osi Y podczas procesu zgniatania nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 140^\circ$



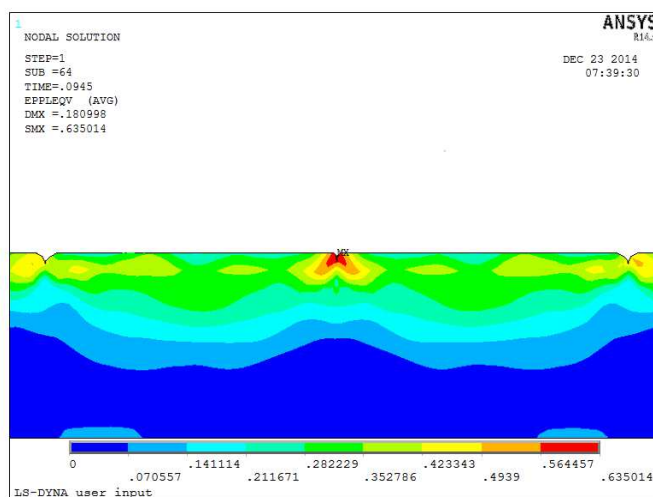
Rys. 8. Przemieszczenie się wybranego punktu węzłowego w osi Y podczas procesu zgniatania nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 120^\circ$



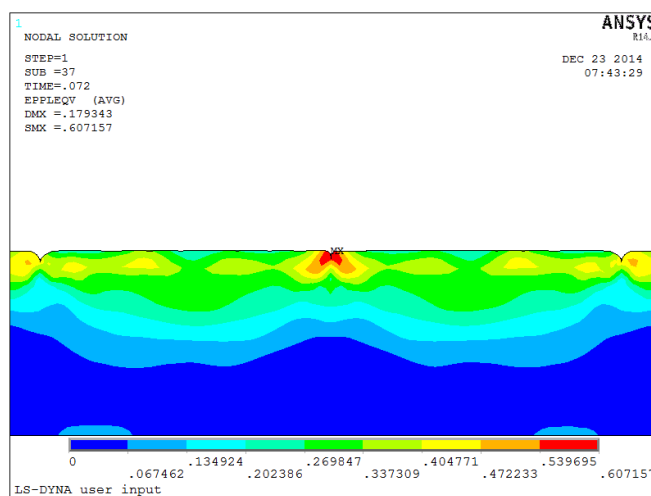
Rys. 9. Przemieszczenie się wybranego punktu węzłowego w osi Y podczas procesu zgniatania nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 90^\circ$

Wyniki symulacji numerycznej potwierdziły wyniki badań eksperymentalnych dotyczących różnych przypadków deformacji nierówności w zależności od kąta wierzchołkowego nierówności. Przeprowadzona analiza statystyczna istotności różnic wartości przemieszczeń dna nierówności obliczonych numerycznie i zmierzonych eksperymentalnie [1] wykazała, że wyniki, nie różnią się istotnie (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$). W związku z tym uznano, że przyjęte modele, algorytmy i opracowana aplikacja w systemie ANSYS są poprawne. Dlatego też możliwe było przeprowadzenie dalszych obliczeń – zastosowanie aplikacji do symulacji różnych zjawisk fizycznych występujących w procesie zgniatania. Opracowana aplikacja umożliwia prowadzenie obliczeń dla różnych parametrów materiałowych, różnej geometrii nierówności w celu określenia składowych stanów przemieszczeń i odkształceń materiału oraz naprężeń w dowolnym punkcie próbki i w dowolnej chwili trwania procesu zgniatania, a także określania warunków występujących w obszarach kontaktu stempla z nierównością – stan nacisków, sił tarcia, obszary przylegania i poślizgu. Opracowane aplikacje pozwalają również obserwować obszary występowania odkształceń sprężystych, co nie było możliwe podczas realizacji badań eksperymentalnych. W badaniach eksperymentalnych zmiany zarysu nierówności określano dopiero po procesie zgniatania, czyli po powrocie sprężystym zachodzącym po całkowitym odciążeniu.

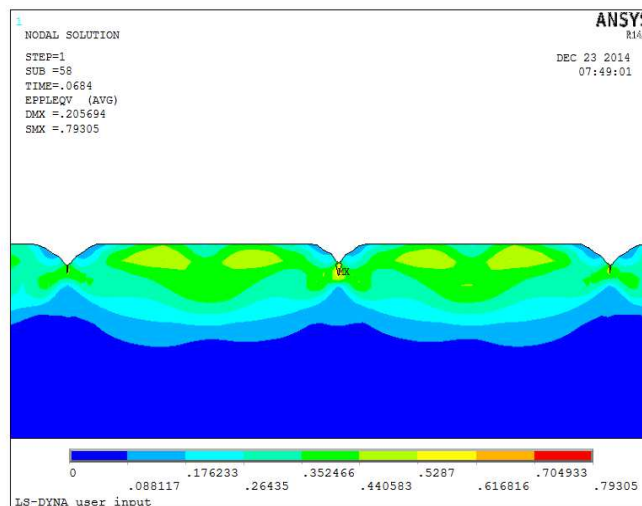
Przykładowo, na rysunkach 10÷13, przedstawiono wyniki obliczeń stanu odkształceń zastępczych według hipotezy Hubera-Misesa-Hencky'ego dla różnych wartości kąta wierzchołkowego nierówności, natomiast na rysunkach 14 i 15 pokazano mapy naprężeń zredukowanych dla kątów $2\theta = 150^\circ$ i $2\theta = 90^\circ$.



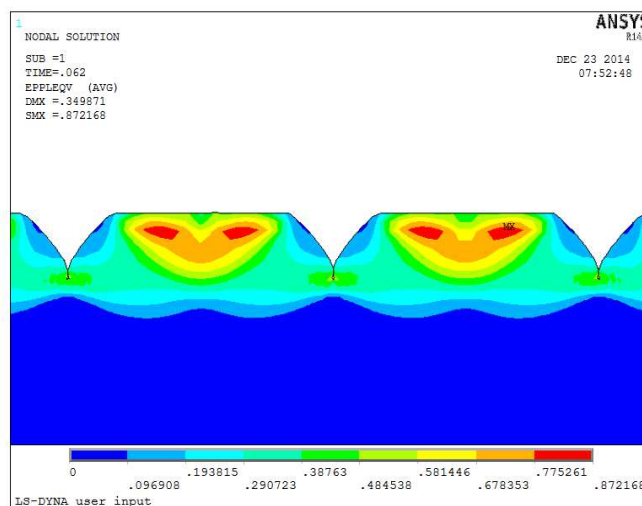
Rys. 10. Mapa odkształceń zastępczych według hipotezy HMM po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 150^\circ$



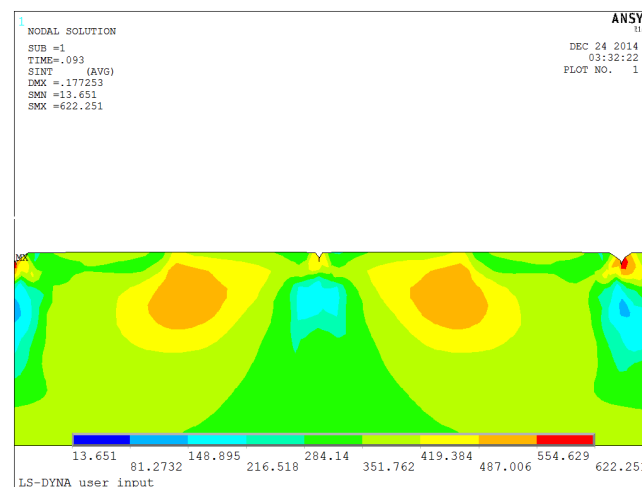
Rys. 11. Mapa odkształceń zastępczych według hipotezy HMM po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 140^\circ$



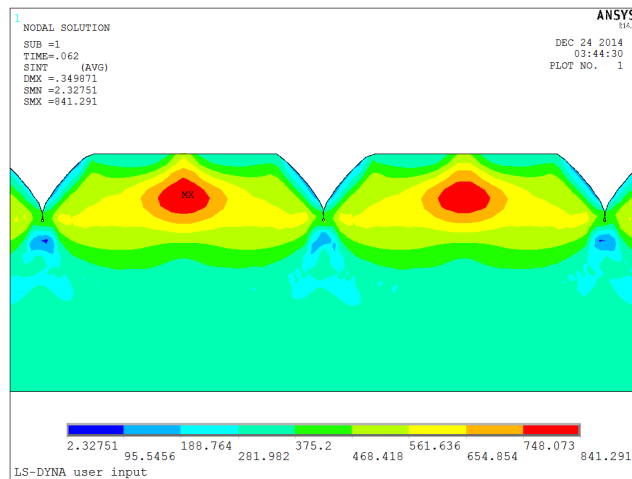
Rys. 12. Mapa odkształceń zastępczych według hipotezy HMM po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 120^\circ$



Rys. 13. Mapa odkształceń zastępczych według hipotezy HMM po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 90^\circ$



Rys. 14. Mapa naprężeń zredukowanych σ_z [MPa] po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 150^\circ$



Rys. 15. Mapa naprężeń zredukowanych σ_z [MPa] po zgniataniu nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 90^\circ$

4. WNIOSKI

1. W pracy zaprezentowano nowoczesny sposób symulacji zjawisk fizycznych w procesie zgniatania regularnych nierówności trójkątnych. Walidacja opracowanej aplikacji numerycznej, poprzez porównanie przemieszczeń den regularnych nierówności trójkątnych, obliczonych numerycznie i pomierzonych eksperymentalnie wykazała, że różnice między nimi są nieistotne w sensie statystycznym (na poziomie istotności $\alpha = 0,05$). Świadczy to o poprawności poszczególnych etapów modelowania i symulacji – zarówno modelowania, jak i dyskretyzacji oraz przyjętych warunków początkowych i brzegowych. Opracowana aplikacja w systemie ANSYS w języku APDL umożliwia analizę czasową stanów przemieszczeń, odkształceń i naprężeń deformowanego materiału nierówności z uwzględnieniem nieliniowości geometrycznej i fizycznej oraz umacniania się materiału w trakcie procesu deformacji. Ponadto możliwe jest określenie składowych stanów przemieszczeń i odkształceń tj. części sprężystej i plastycznej. Możliwe jest prowadzenie obliczeń dla następujących danych: parametry geometryczne (objętość V , wysokość H , kąt wierzchołkowy 2θ , odstęp f), parametry materiałowe (granica plastyczności R_e , moduł umocnienia E_T , współczynnik Poissona ν), stan naprężeń i odkształceń po obróbce poprzedzającej oraz określenie ich wpływu na chropowatość oraz stan naprężeń i odkształceń w warstwie wierzchniej po procesie zgniatania regularnych nierówności trójkątnych. Możliwe jest również określenie położenia obszaru maksymalnych naprężeń i odkształceń (tzw. punktu Bielajewa), nacisków kontaktowych w obszarze styku narzędzia z przedmiotem i dwóch sąsiednich wypływek. Umożliwi to, dla zadanych warunków obróbki, określenie stanu warstwy wierzchniej wyrobu lub odwrotnie, dla wymaganego stanu WW wyrobu, określenie warunków realizacji procesu zgniatania.
2. Z przeprowadzonej analizy numerycznej wynika, że dno nierówności o kącie wierzchołkowym $2\theta = 150^\circ$ podniosło się o 0,08 [mm] co stanowi 34,33% wysokości H całej nierówności, co pozwoliło uzyskać najmniejszą chropowatość powierzchni. Najwyższa wartość odkształceń zastępczych HMH wyniosła $\varepsilon_{z,\max} = 0,64$ i znajdowała się w dnie regularnej nierówności trójkątnej. Natomiast dla nierówności o kącie wierzchołkowym równym $2\theta = 140^\circ$ podnoszenie dna regularnej nierówności trójkątnej wystąpiło tylko w pewnej fazie zgniatania do momentu kontaktu wypływek sąsiednich nierówności i ich zablokowaniu, co uniemożliwiło podnoszenie się dna nierówności. Dno nierówności podniosło się maksymalnie o 0,08 [mm] co stanowiło 25,39% wysokości całkowitej H regularnej nierówności trójkątnej. Odkształcenia HMH wyniosły $\varepsilon_z = 0,61$ i znajdowała się w dnie regularnej nierówności trójkątnej. W następnym przypadku, czyli dla kąta wierzchołkowego $2\theta = 120^\circ$, nastąpiło także częściowe podnoszenie się dna regularnej nierówności trójkątnej do wartości maksymalnej 0,025 [mm] co stanowiło 1,74% całkowitej wysokości nierówności. Odkształcenia zastępcze wyniosły $\varepsilon_{z,\max} = 0,73$ wystąpiły tak samo jak w poprzednich przypadkach w dnie nierówności. W ostatnim przypadku, czyli dla kąta wierzchołkowego $2\theta = 90^\circ$ dno nierówności w początkowej fazie zgniatania podniosło się zaledwie o 0,017 [mm] co stanowi 0,92% wysokości początkowej regularnej nierówności trójkątnej.

3. Symulacje przeprowadzone za pomocą opracowanej aplikacji metodą MES potwierdziły, że dla kąta wierzchołkowego $2\theta = 150^\circ$ dna regularnych nierówności trójkątnych podnoszą się podczas trwania całego procesu zgniatania regularnych nierówności trójkątnych. W celu uzyskania najmniejszej chropowatości powierzchni należy stosować kąt wierzchołkowy z zakresu $2\theta = 140^\circ \div 150^\circ$. Zgniatanie regularnych nierówności trójkątnych o kącie mniejszym niż $2\theta = 140^\circ$ może być stosowane w celu uzyskania rowków smarnych, bądź rowków gromadzących produkty zużycia metalu, przy jednoczesnym zachowaniu dużej nośności i twardości powierzchni. W następnych analizach należy uwzględnić wpływ innych czynników takich jak np. rodzaj materiału nierówności i określić jego wpływ na mechanizm odkształcania regularnych nierówności trójkątnych.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Kukielka L.: *Theoretical and experimental foundations of surface roller burnishing with the electrocontact heating*, Book of Mechanical Engineering. Technical University of Koszalin No 47, Koszalin 1994, pp. 348.
- [2] Kukielka L.: Mathematical modelling and numerical simulation of non-linear deformation of the asperity in the burnishing cold rolling operation. Ed. Dominguez, J; Brebbia, CA Computational methods in contact mechanics V Book Series: Computational and experimental methods Vol. 5, 2001, pp. 317-326.
- [3] Kulakowska A.: *Wpływ odchyłek zarysu regularnych nierówności powierzchni po obróbce toczniem na wybrane właściwości warstwy wierzchniej wyrobu nagniatanego tocznie*. Praca doktorska. Koszalin, 2006.
- [4] Patyk R., Kukielka L.: *Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing*, Steel Research International, 2, 2008, pp. 642-647.
- [5] Kulakowska A., Patyk R., Kukielka L.: *Numerical analysis and experimental researches of burnishing rolling process of workpieces with real surface*, WMSCI 2009 – The 13th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics, Jointly with the 15th International Conference on Information Systems Analysis and Synthesis, ISAS 2009 – Proc. Vol. 2, 2009, pp. 63-68.
- [6] Kulakowska A., Kukielka L., Kukielka K., Malag L., Patyk R., Bohdal L.: *Possibility of steering of product surface layers properties in burnishing rolling process*. Applied Mechanics and Materials Volume 474, 2014, pp. 442-447.
- [7] Przybylski W.: *Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie*. WNT, Warszawa 1979.
- [8] Przybylski W.: *Technologia obróbki nagniataniem*. WNT, Warszawa 1987.
- [9] Kukielka L., Kukielka K.: *Modelling and analysis of the technological processes using finite element method*, Mechanik 2015, (w niniejszym czasopiśmie).
- [10] Kukielka S.: *Experiment Planner 1.0 – komputerowy program planowania eksperymentów rozpoznawczych i właściwych oraz identyfikacji i analizy modelu matematycznego obiektu badań*. Praca magisterska, Politechnika Koszalińska WM, Koszalin, 2002.
- [11] Bathe K.J.: *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice – Hall, Englewood Cliffs, N.J., 1982.
- [12] Kleiber M.: *Duże deformacje ciał sprężysto-plastycznych. Teoria i numeryczna analiza konstrukcji*. Prace IPPT PAN, Warszawa, 1978.