



Wybrane aspekty modelowania nagniatania tocznego

Some aspects of modelling of roller burnishing

ZBIGNIEW MACHYNIA
JANUSZ KALISZ
KAZIMIERZ CZECHOWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.324

Omówiono zalety stosowania nagniatania. Zaprezentowano opracowane narzędzia do gładkościowej obróbki nagniataniem wałków i otworów oraz powierzchni płaskich i krzywoliniowych. Przedstawiono możliwości nagniatania wyrobów w celu uzyskania powierzchni o niskiej chropowatości oraz zagadnienia modelowania nagniatania tocznego płaskiej, gładkiej powierzchni i doświadczalnej weryfikacji przygotowanych modeli.

SŁOWA KLUCZOWE: nagniatanie toczne, nagniatanie powierzchni frezowanej, modelowanie nagniatania

Discussed are advantages of burnishing treatment with the tools designed to smoothly burnish shafts and holes as well as flat and curved surfaces presented. Various ways of burnishing operation intended to obtain smooth finish of the workpiece are thus also presented. Also offered are descriptions of the issues of modelling of roller burnishing of plane smooth surface and experimental verification of the developed models are discussed.

KEYWORDS: roller burnishing, milled surface burnishing, modelling of burnishing

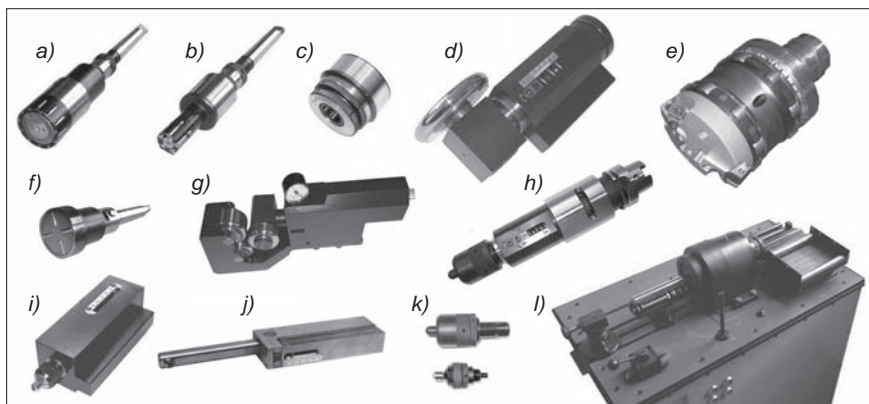
Szybkość i sposób zużywania się części maszyn i innych wyrobów są najczęściej uzależnione od właściwości ich warstwy wierzchniej, a zwłaszcza struktury geometrycznej powierzchni, twardości materiału i stanu naprężeń własnych pozostałych po obróbkach. Odpowiednie właściwości warstwy wierzchniej mogą być kształtowane m.in. w trakcie obróbki wykończeniowej nagniataniem, polegającej na miejscowym odkształcaniu plastycznym na zimno przedmiotu wskutek

siłowego i kinetycznego współdziałania gładkiego narzędzia z powierzchnią obrabianą. Uzyskane w tym procesie przemieszczenie nierówności i zgniot w warstwie wierzchniej obrabianego przedmiotu powodują zmniejszenie parametrów wysokościowych chropowatości powierzchni, zwiększenie udziału materiałowego jej profilu, a także umocnienie warstwy wierzchniej materiału i uzyskanie w niej korzystnego stanu naprężeń ściskających. To z kolei przekłada się na zwiększenie odporności powierzchni na ścieranie i poprawę trwałości pasowania współpracujących części, umożliwia przenoszenie większych nacisków powierzchniowych oraz podnosi wytrzymałość zmęczeniową części. Nagniatanie jest obróbką bardziej ekologiczną niż toczenie gładkościowe lub szlifowanie, bo bez wiórów i pyłów, z niską emisją hałasu i energochłonnością [1].

Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW) od lat prowadzi badania nad procesem nagniatania oraz opracowuje i wykonuje zarówno narzędzia przeznaczone do zastosowania w przemyśle na obrabiarkach konwencjonalnych i sterowanych numerycznie, jak i specjalne wolno stojące urządzenia nagniatające (rys. 1).

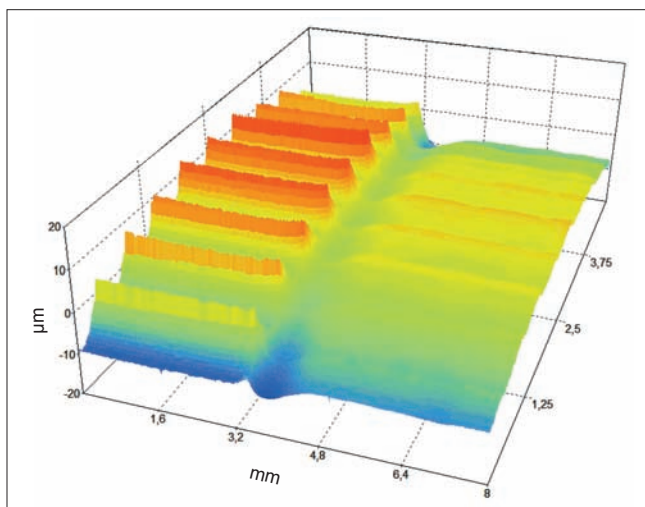
We wcześniejszych artykułach [2+6] omówione zostały wyniki badań doświadczalnych, które potwierdzają, że po nagniataniu powierzchni przedmiotów ze stopów metali, uprzednio toczonech lub frezowanych, można uzyskać bardzo niską chropowatość powierzchni oraz korzystny udział materiałowy jej profilu, co wpływa na poprawę właściwości funkcjonalnych wyrobów.

Na rys. 2 przedstawiono przykładową topografię powierzchni wyrobu ze stopu aluminium EN AW-AlCu4MgSi(A) frezowanej frezem kulistym z węglika spiekane o promieniu $R = 4$ mm i następnie nagniatanej tocznie z dociskiem sprężystym za pomocą kulki o takim samym promieniu, z ceramiki Si_3N_4 , z posuwem roboczym w kierunku prostopadłym do posuwu roboczego frezowania. Widoczne jest wgłębienie między powierzchnią frezowaną i nagniataną – jest to ślad przesuwającej się kulki nagniatającej. Frezowanie przeprowadzono z następującymi parametrami obróbki: prędkością skrawania $v_c = 530$ m/min, posuwem roboczym $f_z = 0,04$ mm/ostre, głębokością skrawania $a_p = 0,5$ mm i posuwem poprzecznym $f_{wf} = 0,53$ mm, a nagniatanie wykonano z: posuwem roboczym $f_t = 6000$ mm/min, siłą nagniatania $F = 75$ N i posuwem poprzecznym $f_{wn} = 0,04$ mm. Topografię powierzchni sporządzono za pomocą profilometru TOPO 01P.



Rys. 1. Przykłady wykonywanych w IZTW narzędzi i urządzeń do nagniatania gładkościowego: a, b) głowice rolkowe do otworów, c) głowica rolkowa do wałków, d) nagniatak krążkowy, e) głowica skrawająco-nagniatająca, f) głowica do powierzchni płaskich pierścieniowych, g) nagniatak trójkątkowy do wałków o dużej smukłości, h) nagniatak toczny do powierzchni frezowanych, i) nagniatak ślizgowy do wałków, j) nagniatak ślizgowy do otworów, k) końcówki robocze do nagniatania tocznego i ślizgowego, l) urządzenie do nagniatania bezkolowego

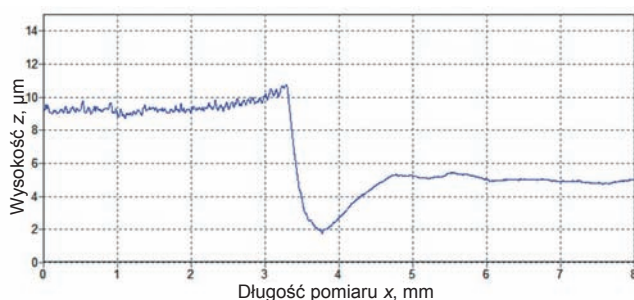
* Mgr inż. Zbigniew Machynia, mgr inż. Janusz Kalisz, dr inż. Kazimierz Czechowski (ios@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania



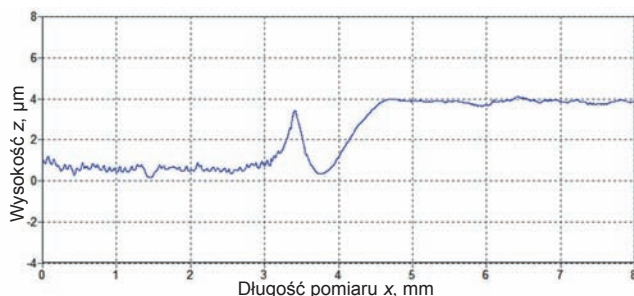
Rys. 2. Topografia powierzchni uzyskanej po frezowaniu za pomocą frezu kulistego o promieniu $R = 4$ mm (po lewej stronie) i następnie nagniatanej tocznie za pomocą kulki ceramicznej o promieniu $R = 4$ mm, z posuwem w kierunku prostopadłym do posuwu frezowania (po prawej stronie)

Na rys. 3 przedstawiono profil pierwotny obejmujący powierzchnię zarówno frezowaną, jak i frezowaną, a następnie nagniataną, wykonany w kierunku prostopadłym do posuwu nagniatania, czyli równoległym do posuwu frezowania – w miejscu występujących wierzchołków po frezowaniu wynikających z kształtu ostrzy frezu kulistego. Z kolei na rys. 4 zamieszczono profil pierwotny powierzchni frezowanej i następnie nagniatanej w miejscu występujących wgłębień po frezowaniu wymiennym frezem.

Badania doświadczalne procesów nagniatania są pracochłonne i drogie, dlatego coraz częściej do rozwiązywania problemów z tego zakresu stosuje się metody numeryczne, pozwalające na obliczanie przemieszczeń, odkształceń i naprężeń w przedmiocie obrabianym. W metodzie elementów skończonych (MES) – związanej z podziałem złożonych



Rys. 3. Przykładowy profil pierwotny powierzchni frezowanej (po lewej stronie) i następnie nagniatanej (po prawej stronie) wykonany w kierunku prostopadłym do posuwu nagniatania, w miejscu występujących wierzchołków po frezowaniu, wynikających z kształtu ostrzy frezu



Rys. 4. Przykładowy profil pierwotny powierzchni frezowanej (po lewej stronie) i następnie nagniatanej (po prawej stronie) wykonany w kierunku prostopadłym do posuwu nagniatania, w miejscu występujących wgłębień po frezowaniu wynikających z kształtu ostrzy frezu

konstrukcji na odpowiednio małe elementy o skończonych wymiarach i określonej liczbie oraz stworzeniem modelu dyskretnego analizowanej konstrukcji – możliwa jest kompleksowa analiza czasowa stanów deformacji (przemieszczeń, odkształceń) i naprężeń występujących w obiekcie składającym się z narzędzia nagniatającego i przedmiotu obrabianego [7].

Odpowiednie oprogramowanie (np. ANSYS) teoretycznie umożliwia przeprowadzenie analizy MES dla dowolnych [7]:

- geometrii przedmiotu i narzędzia (a także ich zmienności w trakcie realizacji procesu),
- materiałów przedmiotu oraz materiałów narzędzia (dla dowolnego modułu Younga, nieliniowej zależności właściwości plastycznych materiału od intensywności odkształceń oraz różnych modeli umocnienia itp.),
- struktur geometrycznych powierzchni po obróbkach poprzedzających (można wprowadzać dowolne wartości promieni zaokrąglenia nierówności i dna między nierównościami oraz ich położenia),
- odchyłek wysokości i odstępów nierówności o zarysie trójkątnym, różnych warunków tarcia w obszarze kontaktu i wartości współczynnika tarcia,
- przemieszczeń poziomych i pionowych narzędzia w czasie.

Analiza MES, zwłaszcza w przypadku zagadnień wielokrotnie nieliniowych (np. nagniatania), wymaga rozwiązywania problemów dotyczących m.in. ograniczeń metod obliczeniowych, modelowania materiałowego i złożonych obciążeń dynamicznych. W związku ze złożonością procesu nagniatania jego modelowanie wymaga w praktyce przyjmowania wielu założeń upraszczających, aby efektywnie przeprowadzić analizę MES. Uwiarygodnieniu tej analizy służy także weryfikacja modeli numerycznych i uzyskiwanych wyników, bazująca na wiedzy z danego zakresu oraz wynikach badań doświadczalnych [7].

Prowadzone w IZTW prace nad możliwością modelowania procesu nagniatania – których przykład dotyczący nagniatania tocznego płaskiej, gładkiej powierzchni przedstawiono dalej wraz z wynikami doświadczalnej weryfikacji – mają charakter wspomagający, a ich celem jest symulowanie procesu nagniatania. W tym przypadku skupiono się na deformacji kształtu powierzchni płaskiej, nagniatanej metodą toczną za pomocą kulki.

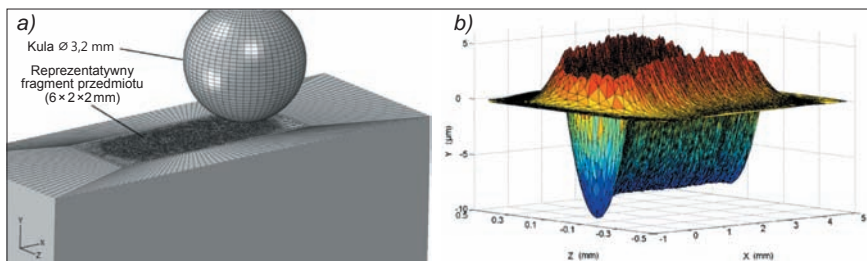
Modelowanie 3D deformacji powierzchni nagniatanej tocznie

Modelowanie nagniatania płaskiej, gładkiej powierzchni może się wydawać nieuzasadnione, ponieważ jednym z istotnych celów nagniatania powierzchni jest poprawa jej struktury geometrycznej (zwłaszcza zmniejszenie chropowatości), a nagniatanie powierzchni gładkiej może jedynie zwiększyć jej chropowatość i falistość. Celem prac było zamodelowanie często pomijanego skutku ubocznego nagniatania – deformacji kształtu powierzchni przedmiotu, a zwłaszcza tworzenia się fałd wokół krawędzi obszaru nagniatanego. Problem ten dotyczy zarówno nagniatania powierzchni obrotowych na tokarkach, jak i powierzchni płaskich oraz krzywoliniowych na frezarkach. Deformację powierzchni przedmiotu nagniatanego (z pominięciem deformacji chropowatości) można z pewnym przybliżeniem zamodelować dzięki symulacji nagniatania gładkiej powierzchni.

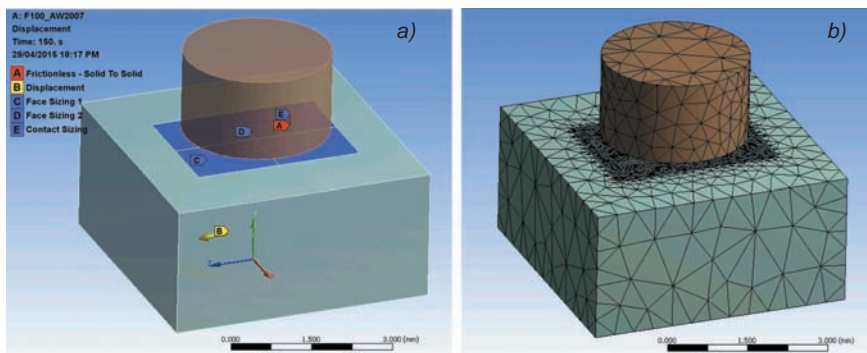
Przykładem pracy dotyczącej tego zagadnienia jest [8], w której m.in. modelowano nagniatanie toczne niewielkiego fragmentu gładkiej powierzchni cylindrycznej (rys. 5a) i wyznaczono topologię powierzchni przedmiotu po czterech przejściach narzędzia (rys. 5b).

W prezentowanej pracy modelowano nagniatanie toczne płaskiej, gładkiej powierzchni przedmiotu. Przyjęto przy tym następujące założenia:

- nagniatanie jest procesem quasi-statycznym,
- siła nacisku w trakcie nagniatania jest stała,
- tarcie między narzędziem a przedmiotem jest pomijalne,



Rys. 5. Model geometryczny przedmiotu i narzędzia (a) oraz wyznaczona topologia powierzchni (b) – wg [8]



Rys. 6. Model obliczeniowy (a) oraz siatka elementów skończonych (b)

- materiał przedmiotu i narzędzia jest jednorodny oraz izotropowy,
- odkształcenia przedmiotu są sprężysto-plastyczne, a narzędzia – jedynie sprężyste,
- materiał przedmiotu podlega umocnieniu izotropowemu.

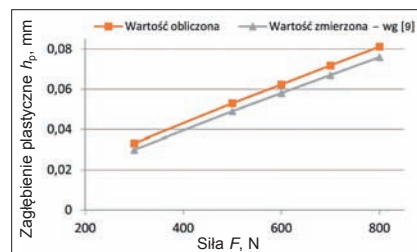
Model nagniatania został opracowany z wykorzystaniem analizy statycznej programu ANSYS Workbench, z uwzględnieniem dużych odkształceń (z zastosowaniem zaktualizowanego opisu Lagrange'a).

Aby uprościć zagadnienie i zmniejszyć jego złożoność obliczeniową, zastąpiono zamocowany obrotowo nagniatający element toczny (kulę toczącą się po powierzchni materiału) elementem nieruchomym – ślizgowym (ślizgającym się po powierzchni materiału). Jest to daleko idące uproszczenie, dopuszczalne jednak ze względu na przyjęcie założenia o braku tarcia między narzędziem a przedmiotem. Ponadto ustalono, że przedmiot nagniatany będzie miał niewielkie wymiary (5×5×2,5 mm). Na tej podstawie opracowano model obliczeniowy (rys. 6).

Na powierzchni przedmiotu wydzielono obszar, w którym może zachodzić kontakt narzędzia z przedmiotem. W tym obszarze (oraz pod nim) zagęszczono siatkę elementów skończonych (wielkość elementu: ok. 0,05 mm). W rezultacie zawierała ona ok. 40 000 elementów i ok. 80 000 węzłów. Kontakt stykających się powierzchni narzędzia i przedmiotu zdefiniowano jako asymetryczny, bez tarcia, z zastosowaniem metody wykorzystującej funkcję kary. Dolna powierzchnia przedmiotu została utwierdzona, a siła obciążająca narzędzie była przykładana do górnej jego powierzchni.

Proces nagniatania realizowano w trzech krokach. W pierwszym kroku narzędzie było odpowiednio pozycjonowane, a następnie stopniowo obciążane siłą – od zera do ustalonej wielkości – prostopadłą do powierzchni przedmiotu (etap zagłębienia). W drugim kroku narzędzie obciążone daną siłą poruszało się po zadanej trajektorii typu „zygzak” (zig-zag). Po osiągnięciu przez narzędzie punktu końcowego siłę zmniejszano do zera i proces się kończył.

Opracowane modele zweryfikowano, biorąc pod uwagę jedynie wielkość odkształcenia trwałego (plastycznego) przedmiotu. Weryfikację przeprowadzono dwustopniowo – najpierw przeanalizowano proces zagłębienia narzędzia (fazę wstępną nagniatania), a następnie samo nagniatanie.



Rys. 7. Wykres zależności obliczonego zagłębienia h_p od siły wciskania F uzyskanych w wyniku modelowania procesu wciskania kulki oraz rzeczywistych pomiarów [9]

Do modelowania oraz weryfikacji procesu zagłębienia wykorzystano dane zawarte w pracy [9] dotyczące wyznaczania rzeczywistych krzywych umocnienia stopów aluminium na podstawie testu zagłębienia kulistego węgelnika ($D = 2,5$ mm). Przedstawioną w pracy krzywą umocnienia stopu aluminium EN-AW2007 wykorzystano do zdefiniowania własności materiału nagniatanego jako materiału izotropowego z umocnieniem wieloliniowym. Wyniki symulacji zagłębienia zweryfikowano, zestawiając (rys. 7) dwa wykresy zależności głębokości h_p zagłębienia

plastycznego (trwałego) od wartości siły F obciążenia – jeden oparty na wynikach modelowania, a drugi – na danych zawartych w pracy [9].

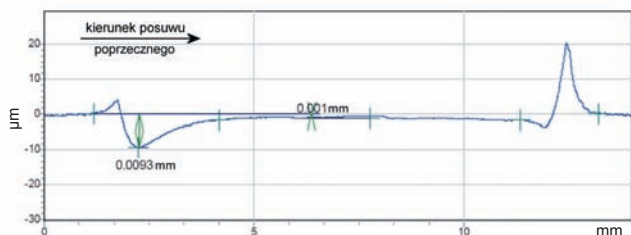
Model procesu nagniatania zweryfikowano na podstawie prób nagniatania stopu aluminium EN-AW2007 oraz wyników modelowania tego procesu z wykorzystaniem krzywej umocnienia stopu przedstawionej w [9]. Najpierw jednak porównano własności plastyczne dostępnego stopu EN-AW2007 oraz stopu zastosowanego w [9] poprzez przeprowadzenie prób zagłębienia w stopie EN-AW2007 z użyciem twardościomierza Brinella z węgelnikiem o tej samej średnicy ($D = 2,5$ mm), której użyto w pracy [9]. Próbkę przygotowano, szlifując ich powierzchnię w celu wygładzenia oraz usunięcia warstwy wierzchniej umocnionej obróbką poprzedzającą (cięcie). Do pomiaru zagłębień plastycznych h_p użyto profilometru TOPO 01P. W tabelicy zestawiono wartości zmierzone z wartościami przedstawionymi w [9].

Próby nagniatania tocznego (z dociskiem sprężystym) przeprowadzono narzędziem UNTF wykonanym w IZTW; element nagniatający miał postać kulki z ceramiki Si_3N_4 o promieniu $R = 4$ mm. Wartości siły nacisku $F_n = 100$ N oraz posuwu wierszowania $f_{wn} = 0,04$ mm przyjęto na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań [5]. Dodatkowo, aby uwidocznić ślady pojedynczych przejść narzędzia, przeprowadzono nagniatanie z bardzo dużym posuwem wierszowania $f_{wn} = 0,2$ mm. Profile powierzchni próbek nagniatanych zmierzono profilometrem TOPO 01P (rys. 8 i 9).

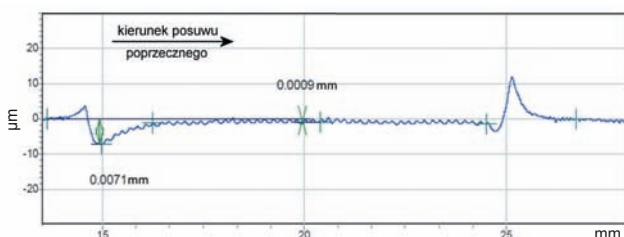
Ze względu na duże rozmiary plików wynikowych ograniczono się do symulacji sześciu przejść narzędzia nagniatane-

| Wartość siły nacisku F , N | Wartość h_p otrzymana doświadczalnie, mm | Wartość h_p wg [9], mm | Błąd względny, % |
|------------------------------|--|--------------------------|------------------|
| 98 | 0,009 | 0,011 | -18,2 |
| 196 | 0,017 | 0,021 | -19,0 |
| 392 | 0,033 | 0,039 | -14,8 |
| 613 | 0,052 | 0,059 | -12,6 |

TABLICA. Wartości zagłębień plastycznych h_p dla próbek EN-AW2007



Rys. 8. Profil powierzchni otrzymany po nagniataniu z siłą $F_n = 100$ N i posuwem poprzecznym (wierszowania) $f_{wn} = 0,04$ mm

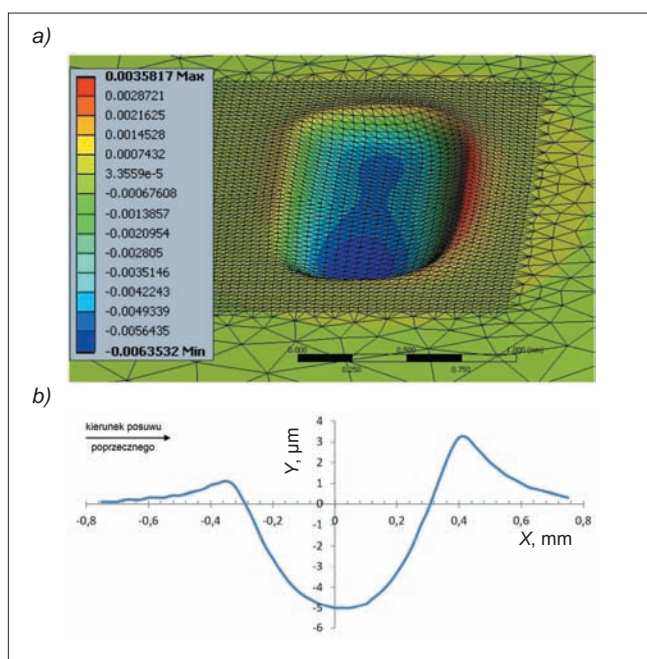


Rys. 9. Profil powierzchni otrzymany po nagniataniu z siłą $F_n = 100$ N i posuwem poprzecznym (wierszowania) $f_{wn} = 0,2$ mm

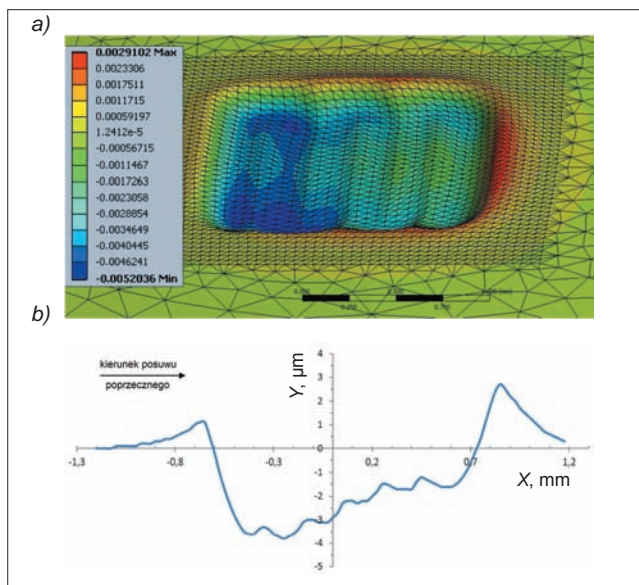
jącego i przyjęto, że długość każdego z nich wynosi jedynie 1,2 mm. W rozpatrywanym przypadku proces nagniatania zdefiniowano w 117 krokach czasowych. Dla tych warunków rozwiązanie zagadnienia wymagało ponad 1200 iteracji, sumaryczny czas obliczeń dwóch używanych rdzeni wyniósł ponad 16 godzin, a pliki wyników miały wielkość ponad 5 GB (z zachowaniem rezultatów tylko dla zadanych kroków czasowych).

Na rys. 10 i 11 przedstawiono uzyskane w wyniku symulacji procesu nagniatania mapy warstwicowe trwałych odkształceń pionowych powierzchni (rys. 10a i 11a) oraz profile tej powierzchni – w płaszczyźnie symetrii modelu (rys. 10b i 11b).

Mimo że obliczone wartości maksymalne odkształceń plastycznych powierzchni są znacznie mniejsze niż zmierzone, to jednak profile nagniatania uzyskane w wyniku symulacji mają wiele cech wspólnych z profilami zmierzonymi. Dotyczy to zwłaszcza profilu przedstawionego na rys. 11b. Podobnie



Rys. 10. Wyniki symulacji dla sześciu przejść narzędzia z posuwem poprzecznym (wierszowania) $f_{wn} = 0,04$ mm przy siłę $F = 100$ N: a) mapa warstwicowa odkształceń pionowych, mm, b) profil powierzchni odkształconego modelu – w płaszczyźnie symetrii



Rys. 11. Wyniki symulacji dla sześciu przejść narzędzia z posuwem poprzecznym (wierszowania) $f_{wn} = 0,2$ mm przy siłę $F = 100$ N: a) mapa warstwicowa odkształceń pionowych (w mm), b) profil powierzchni odkształconego modelu – w płaszczyźnie symetrii

jak profile uzyskane w wyniku pomiarów (rys. 8 i 9) pozwala on zaobserwować stopniowe zmniejszanie się głębokości kolejnych przejść narzędzia oraz zróżnicowanie wysokości fałd materiału tworzących się przed i za nagniatanym obszarem. Obserwowane cechy profili są dość oczywistym skutkiem mechaniki procesu nagniatania, a zwłaszcza umacniania się nagniatanego materiału oraz znacznych odkształceń plastycznych – pionowych i poziomych – warstwy wierzchniej.

Podsumowanie

Przyjęte uproszczenia umożliwiły opracowanie stosunkowo nieskomplikowanego modelu procesu nagniatania powierzchni płaskiej, pozwalającego na efektywne i szybkie przeprowadzenie symulacji oraz wstępne oszacowanie deformacji powierzchni przedmiotu nagniatanego. Taki model może być wykorzystany np. przy projektowaniu procesu nagniatania w celu zmniejszenia niekorzystnych deformacji wokół nagniatanego obszaru.

LITERATURA

1. Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
2. Czechowski K., Kalisz J. „Wybrane aspekty procesu nagniatania”. *Mechanik*. Nr 5–6, (2015): s. 452+455.
3. Czechowski K., Kalisz J., Toboła D. „Wybrane aspekty nagniatania gładkościowego powierzchni toczonych i frezowanych”. *Mechanik*. Nr 10 (2014): s. 775–779.
4. Bednarski P., Biało D., Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Russek P., Toboła D. „Improvement of Tribological Properties of Metal Matrix Composites by Means of Slide Burnishing”. *Materials Science (Medžiagotyra)*. No. 4 (2013): pp. 367+372.
5. Kalisz J., Czechowski K., Polowski W., Janczewski Ł., Czerwiński A., Łętocha A. „Rozwój technologii nagniatania tocznego powierzchni frezowanych”. *Mechanik*. Nr 3 (2014): s. 186+189.
6. Czechowski K., Polowski W., Janczewski Ł., Kalisz J. „Wydajne nagniatanie gładkościowe wałów o dużej smukłości”. *Mechanik*. Nr 12 (2013): s. 1035+1039.
7. Kułakowska A. „Komputerowe modelowanie 3D procesu nagniatania naporowego tocznego części samochodowych”. *Logistyka*. Nr 6 (2011): s. 2067+2075.
8. Balland P., Tabourot L., Degré F., Moreau V. „Mechanics of the burnishing process”. *Precision Engineering*. Vol. 37, Iss. 1 (2013): s. 129+134.
9. Zajkowska A., Derpeński Ł., Seweryn A. „Metody wyznaczania rzeczywistej krzywej umocnienia materiału. Cz. 2. Test wciskania kulistego wgłębnika”. *Acta Mechanica et Automatica*. Vol. 5, No. 1 (2011). ■