

Henryk CZARNECKI^{*}, Michał TAGOWSKI^{}**

MODELOWANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ ZĘBA KOŁA ZĘBATEGO W PROCESIE NAGNIATANIA DYNAMICZNEGO

MODELLING OF GEAR WHEEL TOOTH SURFACE GEOMETRICAL STRUCTURE AFTER A DYNAMIC BURNISHING PROCESS (SHOT PEENING)

Słowa kluczowe:

modelowanie powierzchni, nagniatanie dynamiczne

Key words:

surface structure modeling, dynamic burnishing, shot peening

Streszczenie

W pracy przedstawiono możliwości prowadzenia badań numerycznych formowania struktury warstwy wierzchniej zęba koła zębatego, w trakcie obróbki nagniataniem dynamicznym. Na drodze symulacji komputerowej zobrazowano wpływ parametrów procesu technologicznego na kształtowanie topografii po-

^{*} Politechnika Częstochowska, Wydział Zarządzania, ul. Armii Krajowej 36b, 42-200 Częstochowa, Polska.

^{**} Politechnika Częstochowska, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Informatyki, ul. Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, Polska.

wierzchni oraz na wyznaczenie odkształcenia tworzącego nową SGP. Eksperyment został przeprowadzony z użyciem oprogramowania CATIA oraz Abaqus. Wykazano możliwość prowadzenia symulacji procesu nagniatania.

WPROWADZENIE

Warunki eksploatacyjne maszyn i urządzeń wymagają stosowania niekonwencjonalnych rozwiązań technologicznych mających na celu maksymalne zwiększenie wytrzymałości, bezpieczeństwa pracy i jakości produkowanych wysoko obciążanych części maszyn. W takim kontekście coraz większą wagę przykłada się również do stanu warstwy wierzchniej, szczególnie przy wytwarzaniu elementów maszyn i urządzeń, które podczas pracy podlegają procesom tribologicznym. Zużycie tribologiczne bezpośrednio prowadzi do zmian w warstwie wierzchniej, zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Części maszyn, takie jak koła zębate stosowane do przenoszenia wielkich mocy, są szczególnie narażone na niekorzystne zjawiska wywołujące ich zużywanie. Współpraca kół zębatach, czyli wzajemny kontakt poszczególnych powierzchni ich zębów, wywołuje zmiany mechaniczne, eksploatacyjne oraz fizykochemiczne warstwy wierzchniej w obrębie mikro- oraz makroobszarów powierzchni styku [L. 1, 2, 3]. Biorąc pod uwagę wytrzymałość zmęczeniową części maszyn w aspekcie formowania powierzchni, jest ona ściśle powiązana ze stanem warstwy wierzchniej oraz strukturą geometryczną powierzchni elementów współpracujących. Zatem, rozpatrując zjawiska podczas współpracy dwóch elementów maszyn, należy zwrócić szczególną uwagę na stan i rodzaj wytworzonej technologicznej warstwy wierzchniej. Warstwa wierzchnia jest cienkim obszarem materiału o odmiennej strukturze i innych właściwościach od materiału rdzenia rozpatrywanego elementu. Ograniczona jest powierzchnią rzeczywistą danego przedmiotu i obejmuje część materiału w głąb aż do rdzenia [L. 4, 5]. Należy przez to rozumieć, że warstwa wierzchnia jest to zbiór punktów materialnych zawartych pomiędzy powierzchnią zewnętrzną danego materiału a powierzchnią umowną, która jest granicą wszelkich zmian. Zmiany te zależne są zarówno od rodzaju materiału przy rdzeniu, jego składu chemicznego oraz właściwości fizycznych, jak również od czynników zewnętrznych, czyli rodzaju i parametrów wykonanej obróbki [L. 4]. Przyjmuje się, że najważniejszymi parametrami określającymi właściwości warstwy wierzchniej są: struktura geometryczna, struktura materiałowa, tekstura stref podpowierzchniowych, stan i rozkład naprężeń własnych oraz wielkość i rozległość umocnienia [L. 3, 6]. Poprawę zarówno stanu warstwy wierzchniej, jak i jej struktury geometrycznej uzyskuje się podczas realizacji obróbki wykańczającej danego detalu [L. 7, 8]. Każda operacja odpowiednio wybranego procesu technologicznego powinna zapewnić powstanie wyrobu o określonej, założonej na etapie konstrukcji dokładności wymiarowo-kształtowej oraz o cechach użytko-

wych spełniających wymagania stawiane przez producentów, a przede wszystkim potencjalnych użytkowników.

WYTWARZANIE TECHNOLOGICZNEJ WARSTWY WIERZCHNIEJ

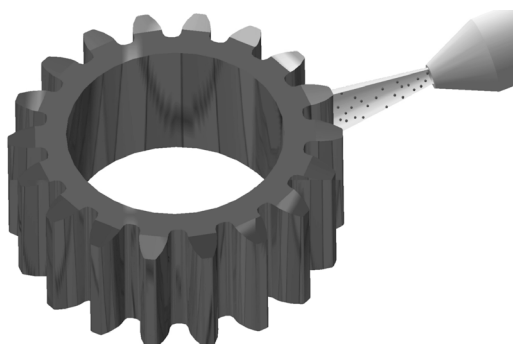
Technologiczną warstwę wierzchnią (TWW) uzyskuje się w wyniku obróbki części maszyn, które poddawane są określonym operacjom kształtującym ich właściwości eksploatacyjne. Obróbka powierzchniowa jest procesem, który ostatecznie formuje strukturę i skład chemiczny warstwy wierzchniej. Właściwości mechaniczne warstwy wierzchniej mogą być kształtowane z wykorzystaniem różnych mechanizmów w wyniku stosowania procesów powierzchniowych obróbek określonego rodzaju. W zależności od zespołu czynności i środków wykorzystanych do wytworzenia warstwy wierzchniej uzyskujemy różne jej właściwości, które winny być optymalizowane pod kątem eksploatacyjnym, tzn. powinny charakteryzować się optymalną chropowatością powierzchni, korzystnym rozkładem udziału materiałowego, dużym umocnieniem materiału oraz występowaniem naprężeń własnych o charakterze ściskającym. Wyżej wymieniony zakres pożądaných cech i właściwości można osiągnąć poprzez zastosowanie operacji technologicznych polegających na odkształcaniu plastycznym materiału na zimno – obróbkę nagniataniem [L. 9]. Można zaobserwować, że obróbka nagniataniem w coraz większym stopniu jest stosowana w przemyśle (szczególnie w angielskim i niemieckim) i zalecana jest jako obojętna obróbka wykańczająca. Należy przy tym zauważyć, że nadal wyraźny jest brak wiarygodnych interpretacji zjawisk fizycznych występujących na styku warstwa wierzchnia–narzędzie, towarzyszących tego rodzaju procesom [L. 10–13].

Kształtowanie warstwy wierzchniej za pomocą obróbki nagniataniem polega na wywołaniu fizycznych zmian stanu warstwy wierzchniej będących efektem lokalnych odkształceń plastycznych zalegających na niewielkiej głębokości względem obrabianej powierzchni [L. 9]. Skutkuje ona uodpornieniem warstwy wierzchniej obrabianego elementu na działanie czynników mechanicznych, cieplnych i chemicznych występujących podczas procesu eksploatacji. Wspomniana wyżej odporność warstwy wierzchniej następuje wskutek wytworzenia nowej, korzystnej struktury o znacznie większej twardości i zazwyczaj korzystnym rozkładzie naprężeń własnych. Obróbka nagniataniem pozwala w stosunkowo prosty sposób na uzyskanie określonej jakości powierzchni oraz nadanie korzystnych eksploatacyjnie właściwości warstwy wierzchniej. W zależności od sposobu oddziaływania elementu nagniatającego na powierzchnię obrabianą można wyodrębnić nagniatanie statyczne w których siły oddziałują w procesie obróbki w sposób statyczny (sztywno lub sprężyste) oraz dyna-

miczne, w których siły nagniatające oddziałują dynamicznie (okresowo zmieniają się) na przedmiot obrabiany [L. 9].

NAGNIATANIE POWIERZCHNI ZĘBÓW KÓŁ ZĘBATYCH

Nagniatanie kół zębatach również można podzielić na dwie kategorie: nagniatanie statyczne i dynamiczne. Metoda statyczna, która jest bardzo rzadko stosowana polega na użyciu specjalnego urządzenia, np. złożonego z trzech kół zębatach o hartowanych i dokładnie szlifowanych zębach, między którymi umieszcza się koło obrabiane. W przypadku metod dynamicznych najczęściej stosuje się nagniatanie z grupy nagniatania strumieniowego – pneumokulowanie, podczas którego powierzchnia przedmiotu poddana jest „ostrzałowi” sferycznymi narzędziami wywołującymi deformację powierzchni (Rys. 1) [L. 14–17].



Rys. 1. Schemat przebiegu procesu pneumokulowania koła zębatego

Fig. 1. Shot peening process schematic diagram

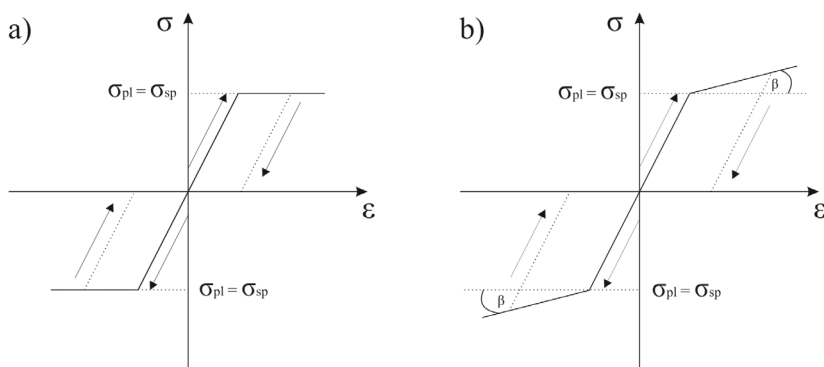
Poszczególne narzędzia służące do nagniatania powinny mieć obły, sferyczny kształt o stosunkowo gładkich krawędziach. Idealnym kształtem byłby kształt kuli. W rzeczywistości cząstki drobiwa nie są idealnie kuliste, lecz mają różne kształty. Podczas obróbki najczęściej stosowane narzędzia mogą być wykonane z odlewanej stali i żeliwa, z ciętego stalowego drutu bądź ze szkła lub ceramiczne czy też mogą to być kulki ze stali łożyskowej [L. 16].

SYMULACJA NUMERYCZNA PNEUMOKULOWANIA ORAZ KSZTAŁTOWANIA WARSTWY WIERZCHNIEJ ZĘBA

Do modelowania procesu i jego oddziaływania na warstwę wierzchnią zęba użyto pary oprogramowania CATIA oraz solver MES Abaqus. W celu przeprowadzenia analizy procesu nagniatania dynamicznego zęba przygotowano model koła zębatego wchodzącego w skład przekładni kombajnu górniczego o parametrach $m = 6$ i $z = 18$. Do analizy przyjęto wycinek jednego zęba, aby

ograniczyć zapotrzebowanie na wymaganą moc obliczeniową. Parametryczny model zęba wykonano w systemie CATIA z wykorzystaniem równań ewolwenty do wyznaczenia jej zarysu. Model numeryczny opracowano w pakiecie Abaqus, z wykorzystaniem metody jawnego całkowania różnic centralnych. Takie podejście umożliwia wyznaczenie przemieszczeń węzłów w analizowanym modelu dla chwili czasu $t + \Delta t$ na podstawie rozwiązań uzyskanych w poprzednich krokach obliczeniowych. Procedura ta charakteryzuje się warunkową zbieżnością i opiera się na implementacji zasady jawnego całkowania wraz z zastosowaniem elementów diagonalnych macierzy masowych.

Podczas realizacji obliczeń zastosowano 2 typy modeli materiałowych Prandtla (**Rys. 2**), tj. model sprężysto idealnie plastyczny – narzędzia i model sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem liniowym – zęb. Zastosowanie obu typów modeli materiałów wynika z tego, że w przypadku kulki założono, że odkształcenie całkowite składa się z odkształcenia sprężystego i plastycznego i na tym etapie analizy nie rozpatruje się umocnienia w kulkach. Natomiast w przypadku kształtowania wgłębień na powierzchni zęba istotne jest wprowadzenie umocnienia celem przeanalizowania wyłączenia materiału na „obrabianej” powierzchni przy tych samych parametrach obróbki.



Rys. 2. Model materiałowy Prandtla: a) model sprężysto idealnie plastyczny, b) model sprężysto-plastyczny ze wzmocnieniem liniowym [L. 18]

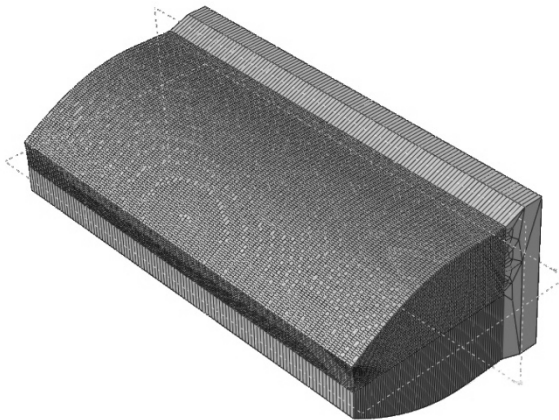
Fig. 2. Prandtl material model a) elastic perfectly plastic model, b) elastoplastic model with linear hardening [L. 18]

Model materiałowy Prandtla zakłada, że odkształcenia plastyczne są na tyle ograniczone, że odkształcenia sprężyste stanowią istotną część odkształceń całkowitych i w związku z tym nie mogą zostać pominięte [L. 19].

W zależności od zachowania się materiału po przekroczeniu granicy plastyczności plastyczność może być idealna lub ze wzmocnieniem. Granica plastyczności dla materiału bez wzmocnienia jest wartością stałą. Dla poszczegół-

nych detali w analizie przypisano materiały, odpowiednio: ząb – stal 20H2N4A, narzędzia (kulki) – stal 100Cr6.

Na **Rysunku 3** zobrazowano wygenerowaną siatkę elementów skończonych zęba podzielonego na partycje, dzięki którym możliwe było lokalne zagęszczenie siatki na powierzchni poddanej uderzeniom.



Rys. 3. Wygenerowana siatka elementów skończonych wraz z widocznymi płaszczyznami partycjonowania

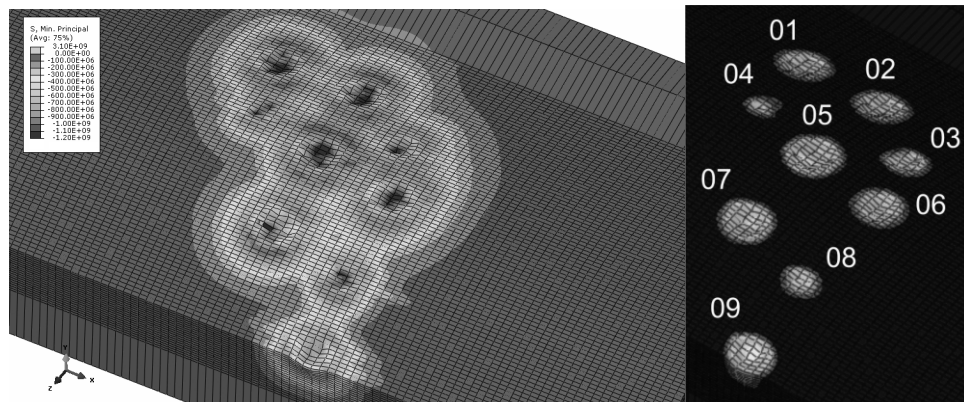
Fig. 3. Finite elements mesh with visible partitioning planes

Rozmiar elementu przy rozpatrywaniu zagadnień związanych ze stanem warstwy wierzchniej ma bardzo duże znaczenie. Zmiany wywołane nagniataniem dynamicznym sięgają od kilku do kilkudziesięciu mikronów. Stąd długość krawędzi pojedynczego elementu na penetrowanej powierzchni dla modelu wynosiła 10 μm .

W symulacji zdefiniowano uderzenia 10 narzędziami w mikrosekundowych odstępach czasu, z prędkością 100 m/s. Starano się tym samym odwzorować rzeczywisty proces nagniatania dynamicznego. Poszczególne kroki czasowe (5 μs) zostały zdefiniowane dla każdego z narzędzi (kulki). W rozpatrywanym przypadku w trakcie symulacji jedno z narzędzi nie uderzyło w powierzchnię obrabianą. Przy uderzeniu dziewięciu narzędzi o obrabianą powierzchnię powstają wgniecenia o różnych kształtach i głębokościach, co zobrazowano na **Rys. 4** wraz z oznaczeniem numerów ich śladów.

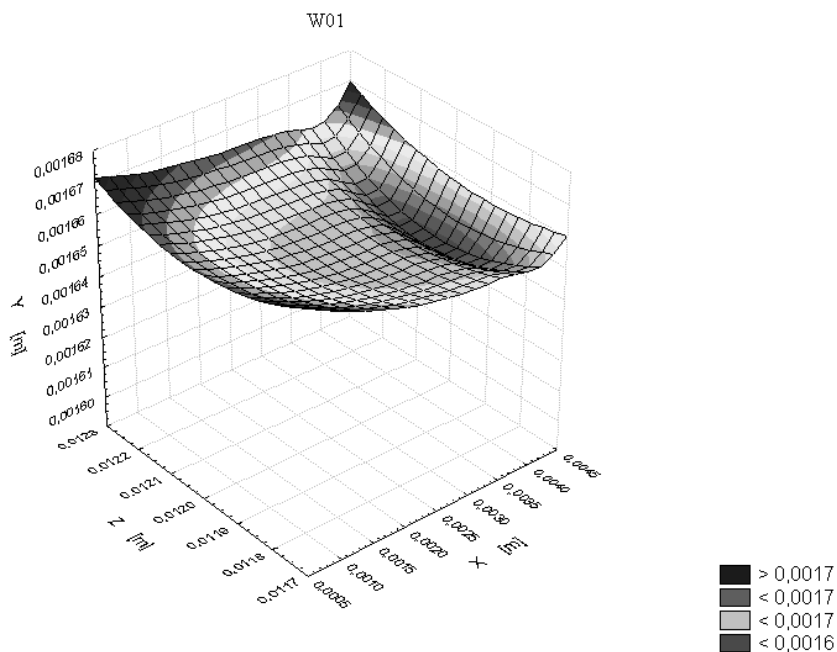
Kształt wgniecenia i jego głębokość zależne są od miejsca uderzenia narzędzia w powierzchnię na ewolwentowej krzywej zarysu zęba, co związane jest ze zmianą kąta padania kulki z uwagi na określony kształt wyrębu koła zębatego.

Zmiany te zobrazowano na **Rysunkach 5–9** w układzie wgnieceń od stopy do wierzchołka zęba, tj. nr 02, 03, 05, 07 i 09.



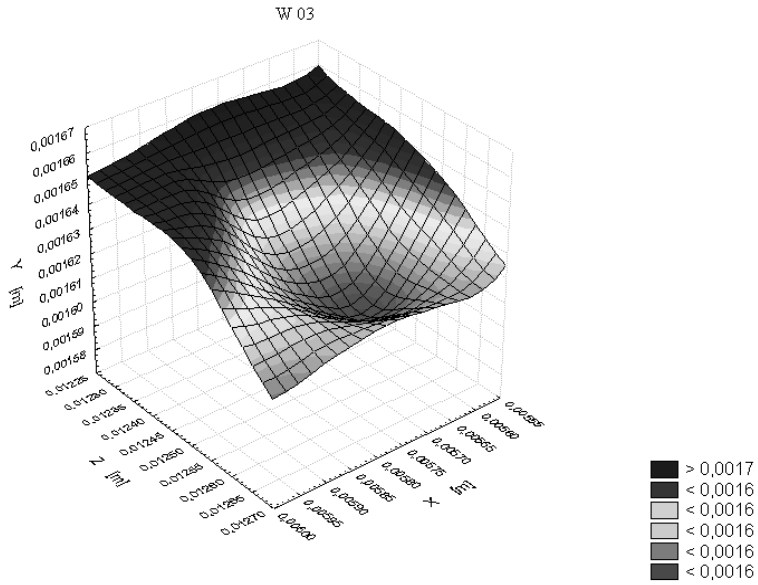
Rys. 4. Widok deformacji i naprężeń na powierzchni zęba po uderzeniu 9 kulek wraz z numeracją ich śladów

Fig. 4. Views of deformations and stress state on the tooth surface after impact of 9 tools with indentations numeration

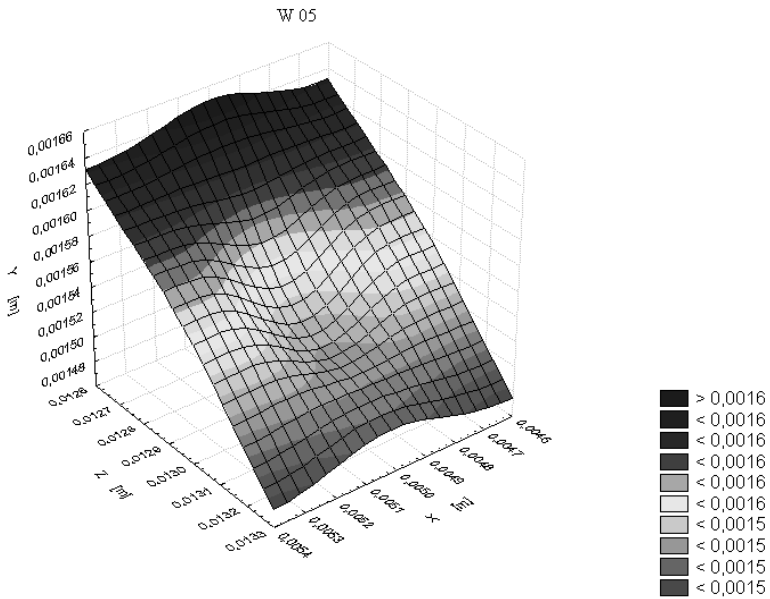


Rys. 5. Obszar wgniecenia 02

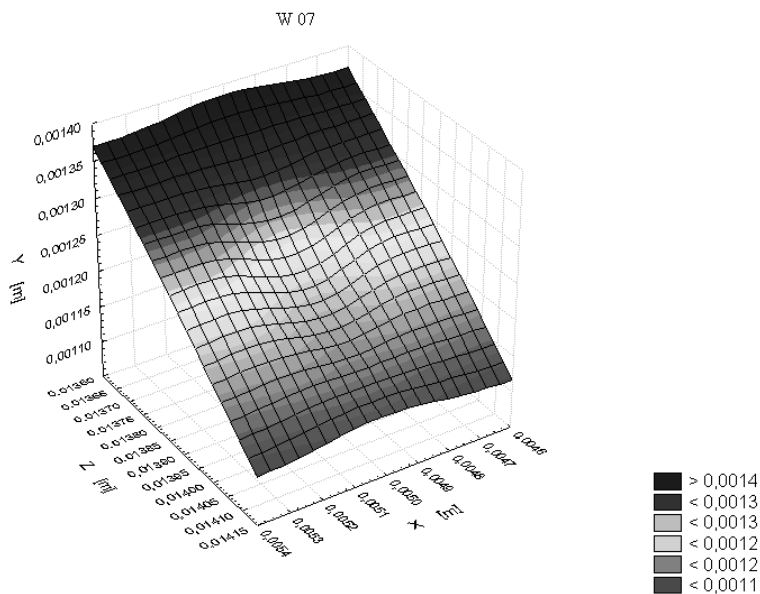
Fig. 5. Area of indentation no. 02



Rys. 6. Obszar wgniecenia 03
Fig. 6. Area of indentation no. 03

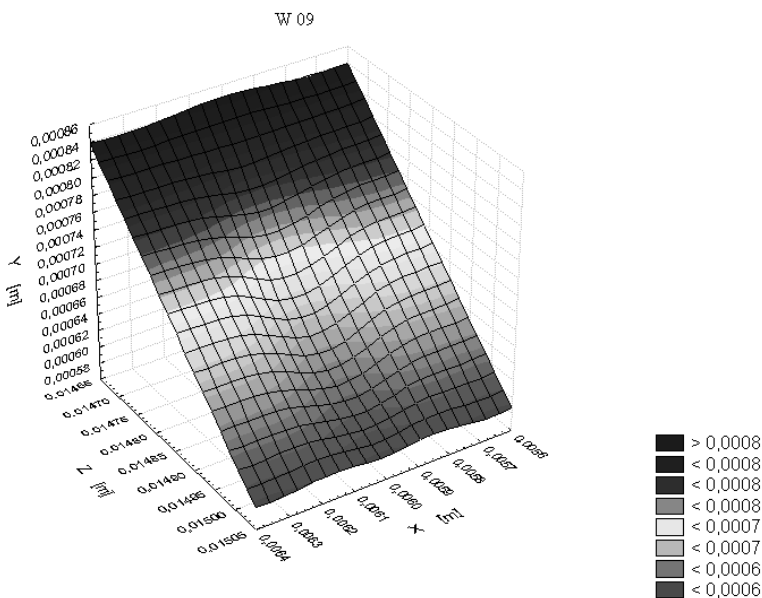


Rys. 7. Obszar wgniecenia 05
Fig. 7. Area of indentation no. 05



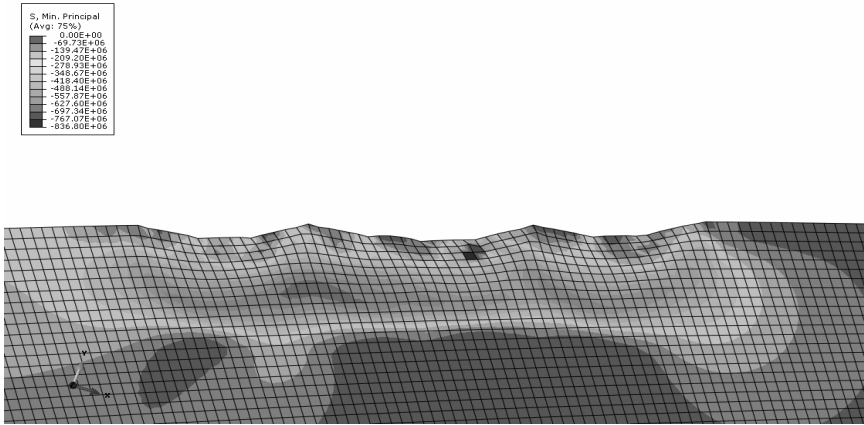
Rys. 8. Obszar wgniecenia 07

Fig. 8. Area of indentation no. 07



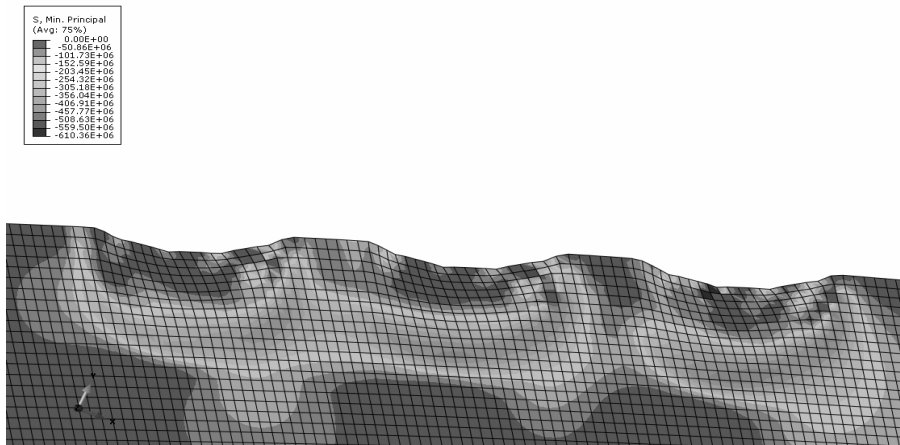
Rys. 9. Obszar wgniecenia 09

Fig. 9. Area of indentation no. 09



Rys. 10. Widok odkształceń i naprężeń w przekroju normalnym w miejscach uderzenia narzędzi 02, 05, 07

Fig. 10. View of deformation and stress state in normal cross-section in the impact areas no. 02, 05, 07



Rys. 11. Widok odkształceń i naprężeń w przekroju normalnym w miejscach uderzenia narzędzi 03, 06, 09

Fig. 11. View of deformation and stress state in normal cross-section in the impact areas no. 03, 06, 09

Opracowany model numeryczny procesu nagniatania dynamicznego dobrze odwzorowuje kształt wgnieceń powstałych w wyniku oddziaływania narzędzia o powierzchnię w zależności od kąta i miejsca jego padania. W przypadku dużego kąta padania narzędzia (60° – 70°) wgniecenia mają charakter bardziej kulisty, dokładniej odzwierciedlając geometrię narzędzia. Do-

datkowo silnie zarysowuje się plastycznie płynący materiał na obrzeżach wgnieceń. W zakresie małych kątów oraz zbliżania się do głowy zęba ślad na obrabianej powierzchni w wyniku poślizgu zaczyna przybierać kształt eliptyczny, głębokość wgniecenia maleje, wypływka pojawia się po stronie odbicia narzędzia. Widok odkształceń w przekrojach normalnych do linii zęba dla wybranych śladów zobrazowano na **Rysunkach 10 i 11**.

Na przekrojach widzimy zdeformowaną siatkę w wybranych miejscach, co świadczy o odkształceniach plastycznych oraz rozkład naprężeń pod powierzchnią. Maksymalne naprężenia pod powierzchnią wynoszą 780–850 MPa. Powtarzając proces, możemy otrzymać pełne pokrycie powierzchni zęba nową strukturą nierówności charakteryzujących się wgłębieniami będącymi odwzorowaniem śladów narzędzia.

PODSUMOWANIE

Opracowany model numeryczny procesu nagniatania dynamicznego dobrze odwzorowuje istotę procesu kształtowania struktury geometrycznej powierzchni zęba koła zębatego pod względem kształtu deformacji w zależności od miejsca uderzenia kulki na krzywej ewolwentowej. Otrzymane wyniki obrazują możliwość prowadzenia numerycznego procesu nagniatania, a tym samym na drodze symulacji komputerowej wyznaczenia wpływu parametrów procesu technologicznego na kształtowanie topografii powierzchni oraz na wyznaczenie odkształcenia tworzącego nową SGP.

LITERATURA

1. Hebda M., Wachal A.: Trybologia, WNT, Warszawa 1980.
2. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i tribotechnika. Wydawnictwo Instytutu Eksploatacji, Radom 2000.
3. Lawrowski Z.: Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie. PWN, Warszawa 1993.
4. Burakowski T., Wierzchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
5. Czarnecki H.: Udział warstwy wierzchniej w kształtowaniu odporności na zużycie tribologiczne, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2008.
6. Dobrzański L.: Materiały inżynierskie i projektowanie materiałowe. Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo. WNT, Warszawa 2006.
7. Schulze V.: Modern Mechanical Surface Treatment. States, Stability, Effects, Wiley-VCH 2006.
8. Suh Nam P.: Tribophysics, Prentice Hall 1986.
9. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. PWN, Warszawa 1987.
10. Czarnecki H.: Analiza teoretyczna wpływu stereometrii powierzchni na działanie pary tribologicznej, Tribologia, r. 36, nr 4, 2005.

11. Czarnecki H., Tagowski M.: Metodyka prowadzenia symulacji współpracy powierzchni rzeczywistych w procesie tarcia suchego, Tribologia, r. 43, nr 4 (244), 2012.
12. Zaborski A., Tubielewicz K.: Analiza przebiegu procesu zużywania warstwy wierzchniej po nagniataniu, praca zbiorowa pod redakcją Włodzimierza Przybylskiego, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2005.
13. Zaborski A.: Analiza formowania strefy deformacji w procesie nagniatania, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2013.
14. Aggarwal M.L., Agrawal V.P., Khan R.A.: A Stress Approach Model for Predictions of Fatigue Life by Shot Peening of EN45A Spring Steel International Journal of Fatigue 28, 2006.
15. Kirk D., Jarrett M.: Influence of Shot-Peening on Fatigue and Corrosion – Fatigue Behavior of Structural Steel, 2nd International Conference on Shot Peening, Chicago 1984.
16. Kirk D.: Shot peening, Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Volume 71, number 4, 1999.
17. Kirk D.: Shot Particle Shapes, The Shot Peener, Fall 2003.
18. Garstecki A., Dębiński J.: Wytrzymałość materiałów, inicjatywa kształcenia bezpośredniego – AlmaMater, Poznań, 2004–2005
19. Zaborski A.P.: Teoria plastyczności i stanów granicznych, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.

Summary

This paper presents the possibility of conducting numerical research on the formation of a new gear tooth surface layer structure during shot peening. FEM simulations show the influence of technological process parameters on surface topography formation and on the determination of deformation shape induced on the surface. The experiment was conducted in CATIA and Abaqus FEM solver. The possibility of conducting burnishing process simulation has also been demonstrated.