

**Henryk CZARNECKI**

Politechnika Częstochowska, Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji  
Produkcji

## **ANALIZA KOMPUTEROWA WYŁĘŻENIA MATERIAŁU W OBSZARZE STYKU NIERÓWNOŚCI W PROCESIE TARCIA**

### **Słowa kluczowe**

Wyłężenie materiału przy styku nierówności, MES.

### **Key words**

Material effort at the contact of irregularities, FEM.

### **Streszczenie**

W opracowaniu przedstawiono przykładowe wyniki analizy komputerowej wyłężenia w nierówności pod wpływem wybranych czynników obciążających system tribologiczny. Obliczeń dokonano w oparciu o teorię elementów skończonych z wykorzystaniem pakietu I-DEAS. Przedstawiono przykładowe wyniki dla modelu nierówności powierzchni szlifowanej obciążonej statycznie i dynamicznie. Otrzymane mapy naprężeń, energii odkształceń i przemieszczeń pozwalają na wnioskowanie o odporności nierówności na wymuszenia oraz umożliwiają wyznaczenia punktu największych naprężeń stycznych.

### **WSTĘP**

Powierzchnie uzyskane w procesie obróbki wykańczającej stanowią wzajemnie nakładające się nierówności i na poziomie powierzchni przylegających w trakcie eksploatacji stykają się tylko pojedyncze wierzchołki o znikomym małej powierzchni. Przy stałym obciążeniu powierzchni i błędach makroskopowych w obszarach tych występują zwiększone naciski powodujące wzrost odkształceń nierówności oraz silną intensyfikację procesów cieplnych w tych obszarach, która jest powodem wzrostu zużycia lub zacierania.

Zjawiska te stwarzają określone problemy związane z wyjaśnieniem procesów zużycia, a wynikają one głównie z faktu, że obserwuje się na ogół skutki po ustaniu współpracy pary ciernej. Praktycznie nie jest możliwa

obserwacja procesu zużycia w skali mikro w czasie jego powstawania (współpracy powierzchni), a tym samym określenie korelacji z wymuszeniem (prędkością, obciążeniem, temperaturą itp.) materiałami, geometrią i mikrogeometrią oraz atmosferą [4,9]. Powoduje to, że wielu autorów tym samym procesom niszczenia przypisuje różne mechanizmy. Jak wykazują analizy dokonane przez Menga i Lude [9], powstają dziesiątki modeli i formuł matematycznych, a wynika to z tego, że modele te i formuły są tworzone na podstawie wyników badań eksperymentalnych, realizowanych w trudno porównywalnych warunkach. Można jednak zauważyć tendencje do systematyzowania badań tribologicznych i odnoszenia warunków realizacji procesów tarcia do zasadniczych czynników tj. geometrii, kinematyki i dynamiki, materiałów, środowiska [4,9].

Przy realizacji tych badań wyodrębnić można przypadki, gdy zużycie jest konsekwencją oddziaływania obszarów elementarnych i wówczas zużycie jest konsekwencją wielokrotnego oddziaływania obciążenia i impulsów cieplnych na pojedyncze nierówności. Wówczas zużycie może zachodzić na skutek oddziaływania mechanicznego (mikroskrawania, bruzdowania, ścinania nierówności oraz odrywania materiału), powodującego również zmianę warunków tarcia, lub może być poprzedzone odkształceniem sprężystym, odkształceniem plastycznym, powstaniem połączeń tarciovych oraz zmianami fizykochemicznymi spowodowanymi oddziaływaniem ciepła i otoczenia. Zużycie wówczas następuje na skutek zmęczenia warstwy wierzchniej oraz zrywania połączeń tarciovych. Koncepcje takiego przebiegu zużycia powstały dość wcześnie i zostały również potwierdzone na drodze eksperymentalnej w pracach E.A. Marczenki [7,9] i grupy IBM kierowanej przez Bayera [4,9]. Badania doświadczalne potwierdzające istniejący stan naprężeń są jednak trudne i kosztowne w realizacji.

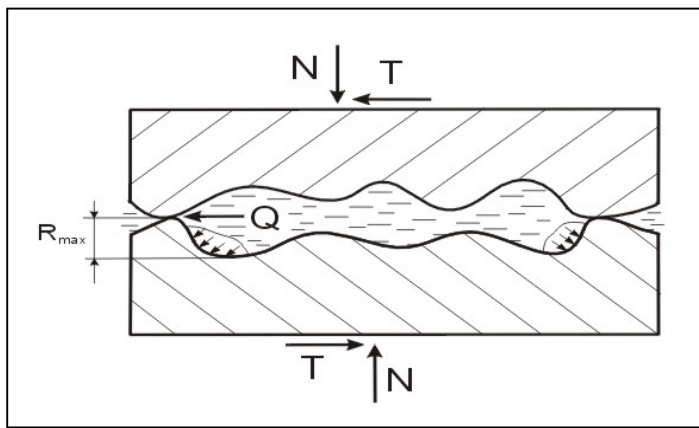
Z tej przyczyny od dawna równolegle do badań eksperymentalnych prowadzone są rozważania teoretyczne uwzględniające analizę zjawisk kontaktowych i ich opis głównie w zakresie obliczeń współczynnika tarcia oraz odkształceń sprężystych i plastycznych. W pracach tych wpływ nierówności powierzchni najczęściej uwzględniany jest przez współczynniki występujące we wzorach opisujących zużycie [4,7].

Stąd do analizy stanu energetycznego warstwy wierzchniej [10], a w szczególności mikrowystępów chropowatości coraz częściej próbuje się wykorzystać techniki komputerowe pozwalające szybciej i taniej wykonać obliczenia [1,2]. W tym celu opracowuje się oprogramowanie do obliczeń wg przyjętych zależności, lub wykorzystuje się gotowe oprogramowanie pozwalające na prowadzenie obliczeń z wykorzystaniem teorii elementów skończonych. W tym przypadku konieczne jest odpowiednie zamodelowanie całej powierzchni lub pojedynczej nierówności. Modelowanie nierówności pojawiło się już w pracach Kragielskiego gdzie wykorzystywane były modele

multichropowatej powierzchni do powiązania elastycznej deformacji z siłą ściskającą [2,4,9].

## BUDOWA MODELU DYSKRETNEGO

W pracy przyjęto model geometryczny styku dwóch powierzchni chropowatych ma charakter dyskretny, tzn. kontakt powierzchni zachodzi między pojedynczymi mikro nierównościami rys.1. Spośród wielu modeli pojedynczych nierówności analizowanych w opracowaniach literaturowych do analizy przyjęto nierówność w postaci stożka ściętego. Wielkość tego ścięcia dobrano przy założeniu, że nierówność o czaszy kulistej została zużyta przy docieraniu na 0,01 jej wysokości.

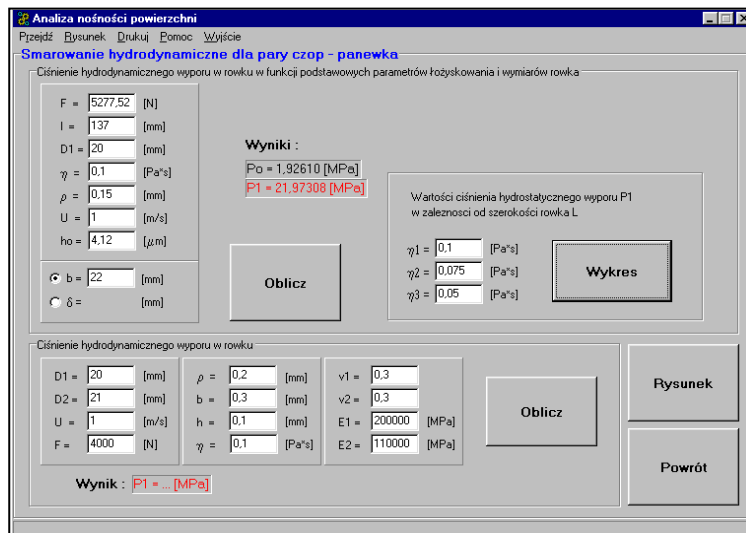


Rys. 1. Schemat oddziaływania nierówności w procesie tarcia  
Fig. 1. Scheme of the interaction of irregularities in the friction process

Przy rozwiązywaniu problemu poczyniono następujące założenia: deformacja ma miejsce w przestrzennym stanie odkształceń, a deformacja każdego z występów nie wpływa wzajemnie na siebie, materiał jest idealnie sztywno-plastyczny i jest izotropowy ze względu na kierunki deformacji oraz ma stałą gęstość.

Nierówności obciążono siłami: normalną  $N$  i tarcia  $T$  działającymi statycznie oraz dynamicznie (zmiennymi w czasie). Biorąc pod uwagę to, że w trakcie procesu tarcia w strefie styku generuje się ciepło również analizowano model obciążony na wierzchołku strumieniem ciepła. Ponadto analizowano przypadek tarcia mieszanego, co oznacza, że we wgłębieniach nierówności na skutek ciśnienia hydrodynamicznego smaru nierówności są dodatkowo obciążone ciśnieniem działającym na ich boki. Wielkość tego ciśnienia

obliczono z wykorzystaniem autorskiego programu służącego do analizy nośności powierzchni w zależności od jej topografii rys.2. Wartości obciążenia normalnego obliczono z uwzględnieniem dopuszczalnych nacisków dla łożyska ślizgowego, a siłę tarcia z uwzględnieniem współczynnika tarcia. Biorąc jednak pod uwagę to, że udział względnej powierzchni styku określany jako stosunek rzeczywistej powierzchni do nominalnej jest bardzo mały i wynosi od kilku do kilkunastu procent [5] zastosowano do obliczeń również większe obciążenia. Natomiast obciążenia cieplne przyjęto na podstawie danych literaturowych [8]. Wymiary modelowanych nierówności przyjęto na podstawie danych własnych i literaturowych [2,3,5].



Rys. 2. Widok okna programu do obliczeń ciśnienia cieczy we wgłębieniu nierówności

Fig. 2. View of the program's window for the computation of liquid pressure in the recess of an irregularity

Obliczeń wyęźnienia nierówności dokonano z użyciem programu komputerowego I-DEAS Master Series 8 firmy SDRC z milord, Ohio. W badaniach zastosowano przestrzenne elementy skończone typu trójkątnego (tetrahedral) oparte na 10-14 węzłach posiadających trzy stopnie swobody. Dla tych elementów wyznaczono naprężenia zredukowane  $\sigma_{red}$  (wg. Hubera), naprężenia normalne  $\sigma_y$ , naprężenia styczne obwodowe  $\sigma_x$ , energię odkształcenia oraz przemieszczenia w kierunkach osi X,Y,Z.

## WYNIKI OBLICZEŃ

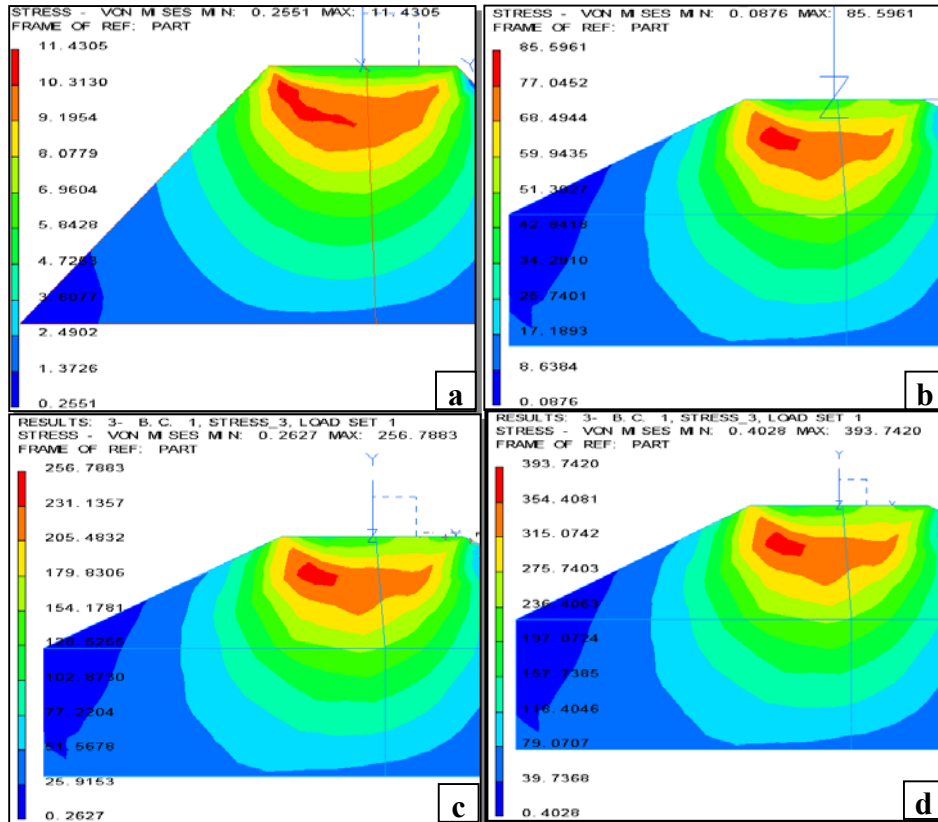
Obliczenia prowadzono dla stali 55 ulepszonej cieplnie, dla której przyjęto następujące stałe materiałowe: moduł Younga  $2,1 \times 10^5$  MPa, liczba Poissona  $G = 0,3$ , gęstość materiału  $\rho = 7,8$  kg/dm<sup>3</sup>, obrobionych wykańczająco szlifowaniem, toczeniem i nagniataniem

Eksperyment prowadzono gdy przyjęty model nierówności obciążony był:

- siłą normalną i styczną działającą statycznie oraz okresowo zmiennie,
- siłą normalną i styczną oraz ciśnieniem wyciskanej cieczy,
- siłą normalną i styczną oraz dodatkowo na wierzchołek działa impuls cieplny powodujący wzrost temperatury na powierzchni nierówności do określonej temperatury (700, 500 i 300<sup>0</sup>)

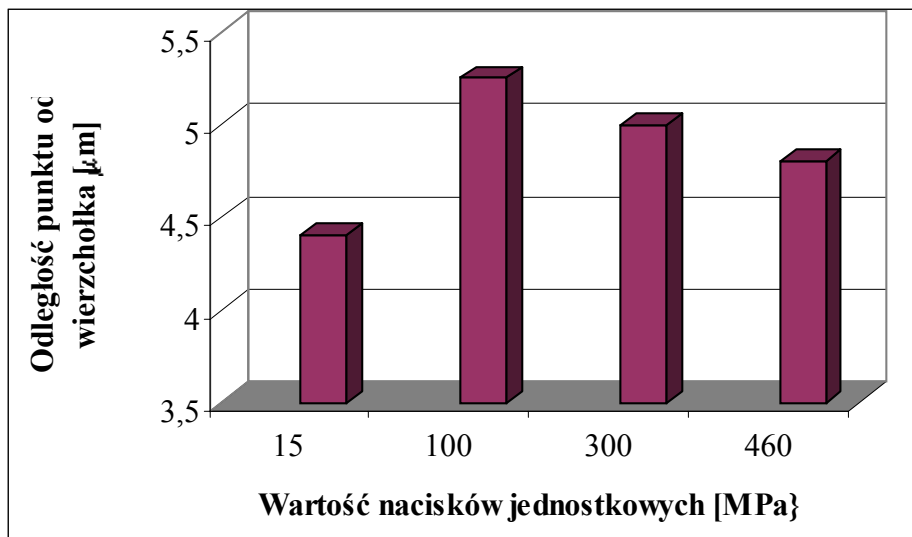
W niniejszym opracowaniu przedstawiono przykładowe wyniki dla modelu chropowatości po szlifowaniu o parametrach geometrycznych:  $R_a = 3,2$   $\mu\text{m}$  i  $R_{\text{max}} = 200$   $\mu\text{m}$  oraz  $S_m = 200$   $\mu\text{m}$ .

Na rys.3. zobrazowano mapy rozkładu i wartości naprężeń zredukowanych dla nierówności obciążonej siłą normalną i styczną przy zmiennych ich wartościach. Widzimy, że maksymalne naprężenia we wszystkich przypadkach są położone pod powierzchnią i są przesunięte z osi nierówności zgodnie z kierunkiem działania siły tarcia. We wszystkich przedstawionych przypadkach możliwe jest wyznaczenie położenia punktu największych naprężeń ścinających. Odległość środka punktu od wierzchołka obrazuje rys.4. W wielu opracowaniach stwierdza się, że przy względnie niskich obciążeniach kontaktowych gdy w punkcie największych naprężeń stycznych ich wartość przekroczy połowę granicy plastyczności to w materiale pojawiają się mikropęknięcia oraz strefa plastycznego odkształcenia [9,11]. Wyjaśnia to powstawanie utwardzenia warstwy wierzchniej w procesie tarcia.



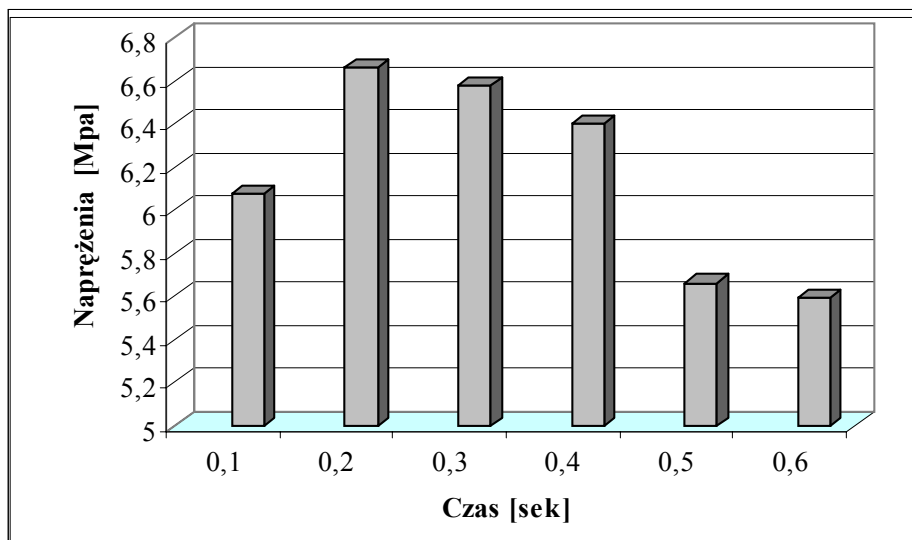
Rys. 3. Rozkład naprężeń zredukowanych  $\sigma_{red}$  w przekroju na kierunku działania sił przy różnych obciążeniach nierówność siłą normalną  
 $N$  [MPa] = : a – 15, b – 100, c – 300, d – 460  
 Fig. 3. Distribution of reduced stresses  $\sigma_{red}$  in the cross-section on the direction of action of forces with different loading of the irregularity by normal force,  
 $N$  [MPa] = : a – 15, b – 100, c – 300, d – 460

Przedstawione obliczenia wykonane zostały dla modelu w którym siły działały statycznie. Proces zużycia jest jednak procesem dynamicznym i nierówności w parze tibiologicznej działają na siebie w sposób dynamiczny. Częstotliwość i czas wzajemnego oddziaływania nierówności zależy od prędkości procesu tarcia. Stąd dokonano obliczeń przy zmiennym czasie, a wyniki przedstawiono na histogramie rys.4. Widzimy, że naprężenia maksymalne zmieniają się wraz ze zmianą częstości oddziaływania obciążenia, przy czym zmiany te nie są regularne. Te badania potwierdzają tezę prezentowaną przez wielu autorów, że przy analizie procesu tarcia powinien być brany pod uwagę iloczyn obciążenia i szybkości ruchu.



Rys. 4. Odległość położenia punktu największych naprężeń ścinających w zależności od obciążenia modelu

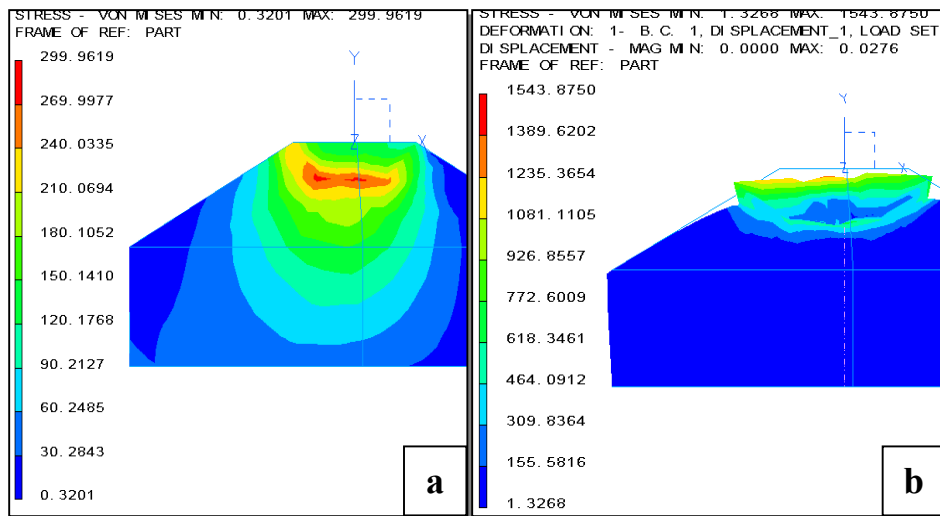
Fig. 4. Distance of the location of the largest shearing stress point as dependent on model loading



Rys. 5. Histogram naprężeń zredukowanych dla nierówności obciążonej siłą normalną i styczną przy zmienny czasie oddziaływania

Fig. 5. Histogram of reduced stresses for an irregularity loaded with normal and tangential force with variable action time

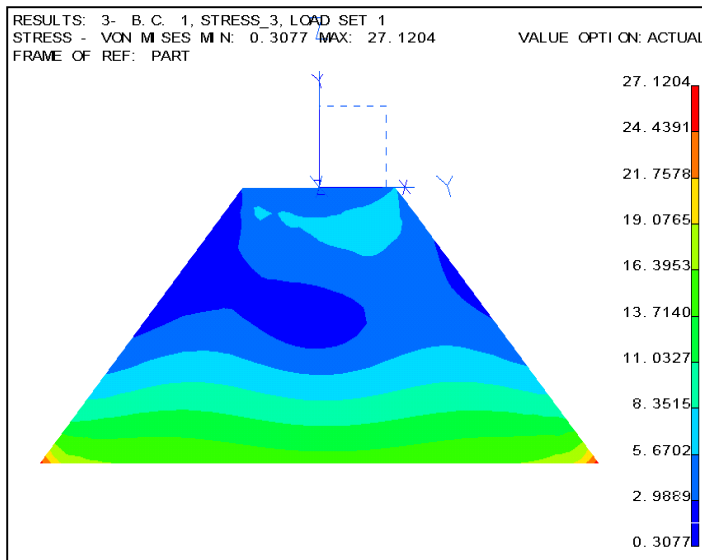
Następnym istotnym czynnikiem wpływającym na proces tarcia jest generowane ciepło. Dlatego też analiza każdego konstruowanego węzła łożyskowego musi dotyczyć również sprawdzenia czy jego zdolność do odprowadzenia ciepła odpowiada wielkości strat energii mechanicznej, tak aby temperatura w strefie tarcia nie przekraczała wartości dopuszczalnej z uwagi na użyte materiały lub smar. Analizę przeprowadzono przy założeniu, że ciepło powstałe podczas tarcia jest uwalniane na powierzchni wzajemnego styku współpracujących ciał. Biorąc pod uwagę, że występ nierówności przemieszcza się z określoną prędkością to problem można traktować jako zagadnienie ruchomego źródła ciepła. W rozpatrywanym przypadku założono, że na wierzchołek oprócz sił powierzchniowych oddziałuje ciepło. Wyniki obrazujące rozkład naprężeń przedstawiono na rys.5, a przemieszczeń rys.7.



Rys. 6. Rozkład naprężeń zredukowanych w nierówności obciążonej siłą normalną i tarcia oraz strumieniem ciepła o temperaturze: a – 100<sup>0</sup> C; b – 700<sup>0</sup> C

Fig. 6. Distribution of reduced stresses in the irregularity loaded with normal and friction forces and a heat flux at a temperature of: a – 100<sup>0</sup> C; b – 700<sup>0</sup> C



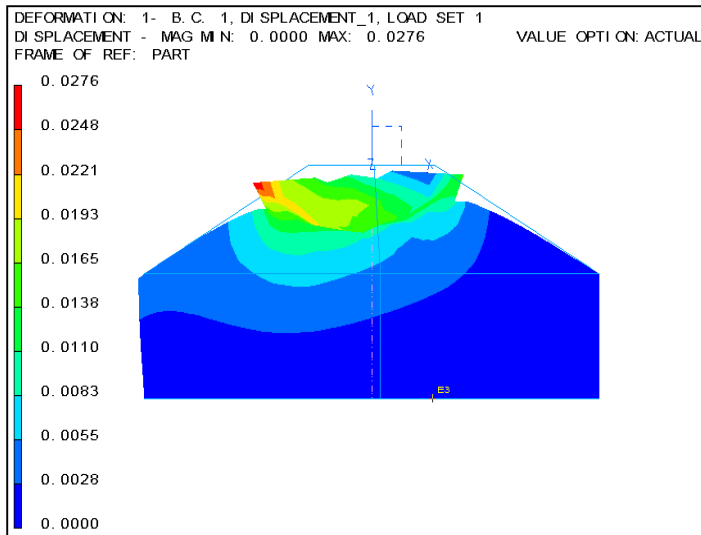


**Rys. 7. Przemieszczenia wynikowe (przekrój w płaszczyźnie XY) dla modelu obciążonego siłami i ciepłem (temp. 700<sup>0</sup>C)**

**Fig. 7. Resultant displacements (cross-section in the XY plane) for the model loaded with forces and heat (temp. 700<sup>0</sup>C)**

O ile strumień ciepła dający na powierzchni temperaturę 100 <sup>0</sup>C powoduje zmianę wartości naprężeń, ale ich rozkład w nierówności jest podobny jak dla przypadku oddziaływania na nierówność tylko sił rys.6a, to dla przypadku gdy nierówność jest obciążona temperaturą 700 <sup>0</sup>C naprężenia maksymalne spod powierzchni przesunęły się na powierzchnie rys.6b. Ponadto spowodowały odkształcenie na samym wierzchołku materiału nierówności, co potwierdza rys.7, na którym tą deformację widać wyraźnie. Badania te pozwalają w szybki sposób dokonać oceny wpływu ciepła na przebieg tarcia. Dalsza analiza zjawiska może pomóc wnioskowaniu o możliwości zajścia szepiania (zespawania) nierówności

W przypadku tarcia mieszane go gdy nierówność oprócz obciążenia powierzchni wierzchołka siłą normalną i tarcia jest obciskana ciśnieniem smaru pochodzącym od ciśnienia mikro klina mapę naprężeń przedstawiono na rys.8.



**Rys. 8. Widok mapy naprężeń zredukowanych dla modelu obciążonego siłami normalną i tarcia oraz ciśnieniem cieczy**

**Fig. 8. View of the map of reduced stresses for the model loaded with normal and friction forces and liquid pressure**

Na podstawie przedstawionej mapy z wartościami naprężeń można stwierdzić, że ciśnienie działające na boki nierówności powoduje zmianę rozkładu maksymalnych naprężeń zredukowanych. Maksymalne naprężenia występują bliżej podstawy, a nie przy wierzchołku, ponadto inny jest ich rozkład przy wierzchołku.

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów można stwierdzić, że symulacja komputerowa pozwala na przeprowadzenie analizy stanu energetycznego modelu nierówności pary trybologicznej. Możliwość uwzględnienia szerokiego spektrum czynników biorących udział w procesie może pozwolić wyjaśnić wiele zjawisk zachodzących w mikroobszarach bez konieczności prowadzenia dość uciążliwych i kosztownych badań. Możliwości techniczne i obliczeniowe jakie stwarza metoda elementów skończonych i sam pakiet programowy I-DEAS pozwala sądzić, że pozwoli na coraz to szersze wykorzystanie technik komputerowych do szybkiej analizy możliwości eksploatacyjnych danego węzła ciernego.

## LITERATURA

1. Czarnecki H.: A computer aided analysis of the interaction of surfaces in the dry friction process. The 2 nd International Conference. Development of metal cutting DMC 98. Kosice 1-2 07. 1998, str. PL 14-PL 19.
2. Czarnecki H.: Wpływ topografii powierzchni na własności eksploatacyjne warstwy wierzchniej. Badania Własne BW – 02 – 201/98/P. Sprawozdanie za 2000-2002. Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji PCz.
3. Czarnecki H.: Wpływ struktury geometrycznej powierzchni na zmęczenie stykowe mikronierówności, Tribologia na progu trzeciego tysiąclecia, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2002, str. 61-66
4. Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i tribotechnika, Wydawnictwo Instytutu Eksploatacji, Radom 2000
5. Nowicki B.: Struktura geometryczna – chropowatość i falistość powierzchni WNT Warszawa 1991
6. Pytko S. Problemy wytrzymałości kontaktowej. PWN, Warszawa 1982
7. Demkin N. B.: Kontaktowanie szeregowatych powierzchni. Izdatielstwo „Nauka” Moskwa 1970
8. Sadowski J.: Termodynamiczne aspekty procesów tribologicznych. Wydawnictwo Politechniki Radomskiej. Radom 1997
9. Zwierzycki W.: Prognozowanie niezawodności zużywających się elementów maszyn, Wydawnictwo Instytutu Eksploatacji w Radomiu
10. Gawroński Z.: Wpływ stanu naprężeń własnych w warstwach azotowanych na zużycie o charakterze zmęczenia stokowego, ZN Politechniki Łódzkiej nr 755, Rozprawynaukowe z. 230, Łódź 1999.
11. Ashby M. F.: Dobór materiałów w projektowaniu inżynierskim, WNT Warszawa 1998

### **Computer analysis of material effort in the region of contact of irregularities in the friction process**

#### **Abstract**

Examples of results of the computer analysis of effort in the irregularity under the effect of selected factors loading the tribological system are provided in the article. Computations were carried out based on the finite-element method by using the I-DEAS package. Examples of results are given for the model of irregularities of a ground surface loaded, respectively, statically and dynamically. The obtained maps of stresses, strain energy and displacements allow an inference to be made on the resistance of irregularities to forcing, and enable the determination of the point of the greatest tangential stresses.