

ROMUALD GAJEWSKI

JAN STANISZEWSKI

WSP w Bydgoszczy

ROLA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W WYBRANYCH DZIEDZINACH  
JEJ STOSOWANIA

Wiadomym jest, że każdy wyprodukowany element, podzespół i gotowy wyrób jest obarczony licznymi błędami wykonania. Na wartość wielkości tych błędów wpływają przede wszystkim czynniki geometryczno-kinematyczne sposobu obróbki, dokładność geometryczna statyczna i dynamiczna obrabiarki, narzędzia, przyrządy i uchwyty oraz rodzaj materiału obrabianego. Stąd też mówi się powszechnie o oddziaływaniu na dokładność obróbki układu O-N-U-P /obrabarka - narzędzia - uchwyty - przedmiot/.

Wszystkie błędy obróbki można by podzielić na błędy wymiaru kształtu i struktury geometrycznej powierzchni we współczesnym szerokim tego sformułowania znaczeniu. Spośród tych trzech elementów składowych dokładności obróbki najmniej poznano dokładność struktury geometrycznej powierzchni, chociaż tej problematyce poświęcono i poświęca się nadal coraz więcej miejsca w literaturze krajowej i zagranicznej. Powodem takiego stanu rzeczy jest wiele braków zwłaszcza natury poznawczej. W niniejszym artykule postanowiono jedynie zasygnalizować trzy następujące kwestie mające najbliższy związek z tematem artykułu.

- 1/ strukturę geometryczną powierzchni stanowią drobne nierówności występujące na powierzchni obrabianej, często niewyobrażalnie małe, nie dające się łatwo mierzyć;
- 2/ trudno jest znaleźć najwłaściwsze wyróżniki struktury geometrycznej powierzchni, które by ją charakteryzowały pod względem funkcji jaką ona spełnia i powinna spełniać w wielu dziedzinach techniki, inne bowiem cechy i charakter musi mieć powierzchnia obrabiona różnymi sposobami, gdy ma ona spełniać funkcję użytkową lub technologiczną, inne gdy chodzi o jej walory ozdobne;

3/ nie poznano dostatecznie dokładnie wzajemnych proporcji pomiędzy wymienionymi już poprzednio elementami składowymi dokładności obróbki.

#### Niektóre wyróżniki nierówności powierzchni

Spośród elementów składowych struktury geometrycznej powierzchni najczęściej miejsca poświęcono chropowatości. Najbardziej znane i stosowane są trzy jej wyróżniki, a mianowicie  $R_z$ ,  $R_{max}$ ,  $R_a$ . Wysokość  $R_{max}$  określa odległość pomiędzy najwyższym wierzchołkiem a najniższym punktem wgłębienia na odcinku rozpatrywanego profilu. Wysokość chropowatości  $R_z$  określa odległość rzędnych linii wierzchołków i wgłębień profilu nierówności.  $R_{max}$  określa zatem maksymalną nierówność i daje pewne wyobrażenie o rozpiętości rzędnych oraz o zakresie danych charakteryzujących ogólnie powierzchnię obrabianą.  $R_z$  charakteryzuje średnią nierówność powierzchni. Nie określa jej walorów użytkowych, podobnie jak wyróżnik  $R_a$ , głównie dlatego że nie uwzględnia odległości pomiędzy poszczególnymi wzniesieniami i wgłębieniami i charakteru profilu.

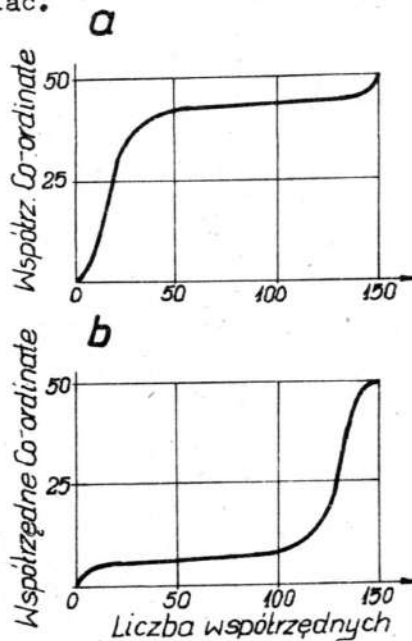
Dla zobrazowania znaczenia wyróżników np.:  $R_{max}$ ,  $R_z$  zamieszczono profilogramy powierzchni /Rys. 1/, z których Rys. 1b jest odwróceniem profilu z Rys. 1a.



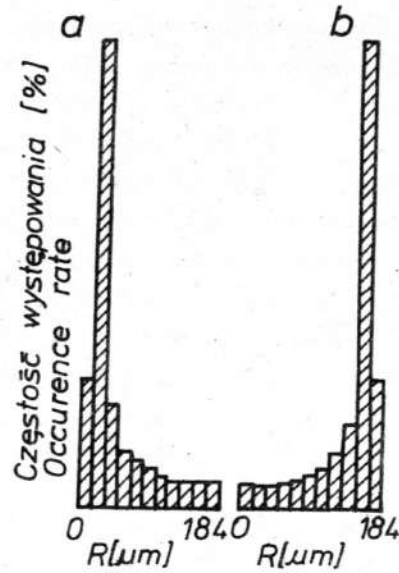
Rys. 1. Przykłady różnych pod względem użytkowym profili nierówności powierzchni o takim samym  $R_z$  i  $R_{max}$  nierówności

Z przykładu zobrazowanego na Rys. 1. wynika, że profile 1a i 1b charakteryzują takie same wartości parametru  $R_{\max}$  i  $R_z$  nierówności, pomimo różnych wartości użytkowych. Profil 1a przedstawia powierzchnię o dużej zdolności przylegania, natomiast profil 1b jest przeciwstawieniem tak rozumianej przydatności profilu. Ta nieadekwatność wartości parametrów  $R_{\max}$  i  $R_z$  do funkcjonalności powierzchni stwarza potrzebę poszukiwania innych jej wyróżników takich jak współczynnik zmienności, częstość występowania nierówności, udział nośny profilu itp.

Profilogramy powierzchni zamieszczone na Rys. 1, zobrazowano dodatkowo na Rys. 2 i 3., z których Rys. 2a i 2b przedstawiają krzywe Abbotta a Rys. 3a i 3b. diagram częstości występowania nierówności powierzchni. Obliczono również współczynnik zmienności chropowatości nierówności przedstawionych na Rys. 1. Dla obu profili a i b jest on jednakowy i wynosi  $v = 8\%$ , tym samym nie charakteryzuje on powierzchni z punktu widzenia jej przydatności. Różne są natomiast diagramy częstości występowania nierówności i krzywe Abbotta dla obu profili "a" i "b" z Rys. 1. Stąd można przypuszczać, że te dwa wyróżniki, a zwłaszcza krzywe Abbotta, najlepiej charakteryzują powierzchnię z punktu widzenia funkcji jaką ma ona spełniać.



Rys. 2. Krzywe Abbotta profilogramów powierzchni zobrazowanych na Rys. 1.

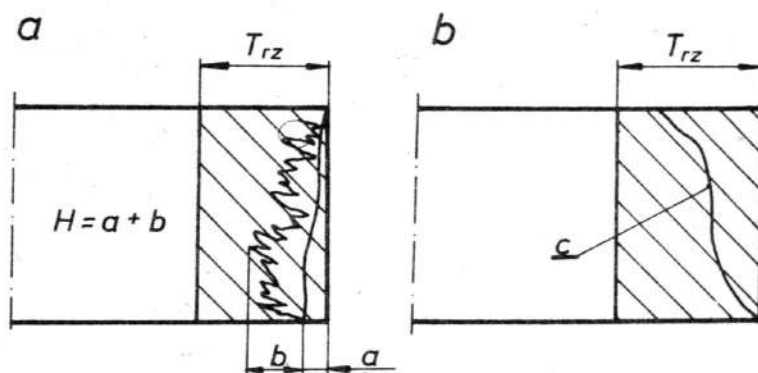


Rys. 3. Diagramy częstości występowania nierówności profili powierzchni zobrazowanych graficznie na Rys. 1.

#### Związek nierówności powierzchni z tolerancjami wymiaru

Trzy elementy składowe dokładności obróbki /dokładność wymiaru, kształtu i struktury geometrycznej powierzchni/, jak już wiadomo, występują w każdym sposobie obróbki, jednak w różnej, słabo poznanej proporcji. Można by to zinterpretować graficznie na przykładzie ogólnym /Rys. 4a/, lub szeregowo rozwijając rzeczywistą powierzchnię w krzywą nośności Abbotta - zobrazować na Rys. 4b.

Dane szczegółowe zobrazowane graficznie na Rys. 1 i 3 oraz ogólne - Rys. 4. pozwalają na stwierdzenie, że model nominalny kształtu powierzchni /bez uwzględnienia nierówności/ różni się w sposób zdecydowany od modelu rzeczywistego, co może mieć różny sens fizyczny w różnych dziedzinach techniki.



Rys. 4. Związek zarysu nierówności z tolerancjami wymiarowymi  
/T<sub>rz</sub>/ H - skrajnia zarysu nierówności,  
a/ pasmo błędów kształtu, b - pasmo chropowatości,  
c/ krzywa Abbotta

- Rola struktury geometrycznej powierzchni w elementach niekojarzonych jest najmniej znana i opisana zwłaszcza w sposób sformalizowany. Poza nielicznymi przypadkami, w chwili obecnej można jedynie w sposób werbalny wskazać na zasadnicze funkcje powierzchni:
- 1/ powierzchnie wzmacniające, tłumiące lub odbijające dźwięki,
  - 2/ powierzchnie przyjemne w dotyku lub miłe dla oka,
  - 3/ powierzchnie odporne na zabrudzenie,
  - 4/ powierzchnie zwiększające wytrzymałość na zginanie i udarność,
  - 5/ powierzchnie przydatne do różnych sposobów ich "wykańczania"  
/powierzchnie zabezpieczające, połysk i mat./,
  - 5/ powierzchnie nadające się do różnych sposobów obróbki,
  - 7/ powierzchnia próbek do badań,
  - 8/ powierzchnie cierne lub ślizgowe /utrudnienie lub ułatwienie wzajemnego ruchu ciał: klocki hamulcowe, prowadnice, podłogi, rękojeści, chwytaki, pokrętła/,
  - 9/ powierzchnie przeznaczone do sklejanego różnego rodzaju klejami,
  - 10/ powierzchnie odporne na działanie szkodników.

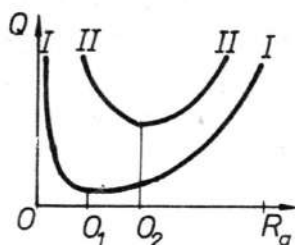
Z reguły powierzchnie spełniają kilka funkcji zarówno z punktu widzenia zdobniczego, technologicznego i użytkowego, przy czym wymagania powierzchni rosną w miarę liczby funkcji jakie mają one spełniać

powierzchnia galwaniczna z połyskiem musi być wypolerowana. Podłoże powinno być wyszlifowane bardzo dokładnie, nie może zawierać żadnych widocznych śladów obróbki jak rysy, wgnioty, pęknięcia. Powierzchnia nie powinna mieć falistości, odchyżeń od płaskości, wichrowatości, ponadto powinna zapewniać dobrą przyczepność powłok, itp. Ocena powierzchni przedmiotu obrabianego powinna w związku z tym obejmować wymagania w zakresie użytkowości, technologiczności i ozdobności. Ocena taka polega zatem na porównaniu cech powierzchni, jakie przedmiot obrabiany nabył, po zastosowaniu określonego sposobu obróbki, z cechami wymaganymi z technologicznego użytkowego czy zdobniczego punktu widzenia. Określenie obiektywnych cech powierzchni nastrocza jak dotychczas wiele trudności.

#### Rola struktury geometrycznej powierzchni w połączeniach mieszanych i wytłaczanych

We wszystkich połączeniach mieszanych i wtłaczanych rola struktury geometrycznej powierzchni sprowadza się do jej roli użytkowej i technologicznej. Jej wpływ w tym przypadku jest wysoce istotny.

Wpływ chropowatości powierzchni przedstawiono schematycznie wg Diaczenki /8/ na Rys.5. Obie krzywe na Rys.5 wykazują minimum w punktach  $O_1$  i  $O_2$  odpowiadających optymalnej chropowatości, dla której ścieranie materiału jest najmniejsze. W cięższych warunkach eksploatacji krzywa zużycia przemieszcza się na prawo ku górze /krzywa II/ a punkt optymalny chropowatości przemieszcza się w kierunku wyższych nierówności powierzchni. Zwiększenie chropowatości ponad jej wartość optymalną powoduje szybsze zużycie ściernie tzn. szybsze powstawanie luzów pomiędzy współpracującymi elementami na skutek ząbienia się, zgniatania i ścinania wierzchołków nierówności. Zmniejszenie chropowatości poniżej optimum również powoduje wzrost zużycia trących o siebie powierzchni, aż do stanu zbliżonego do optymalnego. Zależy to od warunków współpracy, usytuowania śladów obróbki w stosunku do wzajemnego przemieszczania się trących o siebie elementów maszyn oraz od warunków smarowania.



Rys. 5. Schemat zależności zużycia od chropowatości powierzchni /wg P.E. Diaczenki/

- Q - ubytek objętościowy materiału w wyniku zużycia,
- I - zależność dla lżejszych warunków eksploatacyjnych,
- II - zależność dla cięższych warunków eksploatacyjnych

Elementy mechanizmów pracujących w warunkach zmiennych obciążeń wykazują wzrost wytrzymałości zmęczeniowej w miarę spadku chropowatości, ponieważ nierówności powierzchni, rysy i bruzdy stanowią skupiska naprężeń przyspieszających proces zmęczenia materiału. Pomiedzy chropowatością powstałą w wyniku obróbki mechanicznej elementów maszyn a wymiarową dokładnością ich wykonania zachodzi niewątpliwie, jak to już powiedziano, wzajemna współzależność. Zagadnienie to nie jest jeszcze dostatecznie zbadane. Według Sadowskiego /8/ np. zależność ta może się kształtować następująco:  $R_z = 0,075 T$  - dla wymiarów podstawowych,  $R_z = 0,15 T$  - dla wymiarów pomocniczych. W oparciu o wyniki Korony /9/ można by stwierdzić, że o trwałości i nośności współpracujących części decyduje udział skrajni zarysu H w obszarze tolerancji rzeczywistych  $T_{rz}$ . Zależność zaś  $H = 0,3 T_{rz}$  jest najbardziej korzystna.

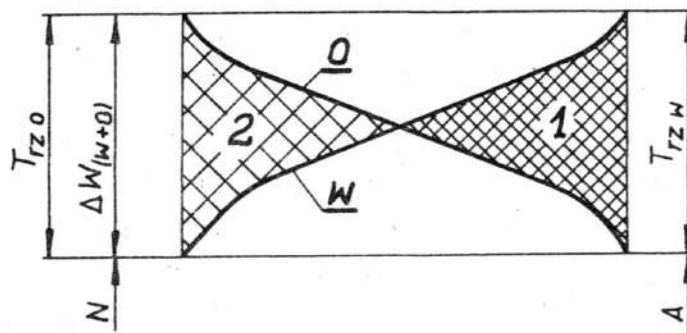


W sposób bardziej złożony przedstawia się użytkowa rola skrajni zarysu nierówności powierzchni w połączeniach mieszanych i wtlaczanych wykonanych z materiałów anizotropowych higroskopijnych. W literaturze przedmiotu z tego zakresu przyjmowany model kontaktu powierzchni w połączeniach jest modelem nominalnym; pomija się całkowicie rolę chropowatości jako czynnika kompensującego konsekwencje zmian rodzaju pasowań zachodzących pod wpływem zmian wilgotności. Czynniki ten /zmiany wilgotności w połączeniach/ zmieniający rodzaj pasowań nie ma żadnego znaczenia w połączeniach wykonanych z materiałów izotropowych. Wpływ zmian wilgotności w połączeniach wykonanych z materiałów izotropowych niehigroskopijnych lub temperatury: powoduje jedynie przesunięcia wymiarów nominalnych bez zmiany rodzaju pasowania. Z tych zasadniczych względów użytkową rolę struktury geometrycznej powierzchni w połączeniach wykonanych z materiałów anizotropowych higroskopijnych można sformułować jedynie hipotetycznie w następującym brzmieniu: czynnikiem decydującym o nośności i trwałości połączeń, kojarzonych wg pasowań mieszanych i wtlaczanych wykonanych z materiałów anizotropowych higroskopijnych jest znaczny udział skrajni zarysu nierówności powierzchni w obszarze tolerancji wykonania wałka i otworu.

Na Rys. 6. zobrazowano sposób zazębienia się krzywych Abbotta na przykładzie połączeń mieszanych wykonanych z materiałów anizotropowych higroskopijnych. Na Rys. 6. powierzchnia 1 wyobraża objętość odkształconych nierówności, zaś powierzchnia 2 - pustą przestrzeń lub objętość kleju, jeżeli mamy do czynienia z połączeniem klejowym.

Podczas zmian wilgotności zachodzących w trakcie montażu i użytkowania tych połączeń zachodzi wzajemne przemieszczanie się krzywych nośności wałka /w/ i otworu /o/ do skrajnych położań. Charakteryzują one początek utraty nośności połączenia. W pierwszym przypadku skrajnym, w którym wystąpi utrata kontaktu skrajni zarysu nierówności, zachodzi zniszczenie spoiny klejowej. W drugim skrajnym przypadku wystąpi wyczerpanie się zapasu nośności elastycznej skrajni zarysu nierówności. W tym przypadku połączenie ulegnie zniszczeniu na skutek działania ciśnienia pęcznienia i kurczenia się materiału połączenia. Podstawową zatem funkcją skrajni zarysu nierówności powierzchni jest niejako akumulowanie nośności powierzchniowej połączeń kojarzonych wg pasowań mieszanych i wtlaczanych. Z tych rozważań wynika, że tego typu połączenia są tym bardziej trwałe i nośne w czasie im stosunek





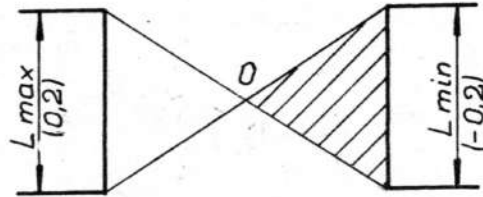
Rys. 6. Sposób zazębiania się krzywych nośności Abbotta na przykładzie pasowania mieszane

$T_{rzo} / T_{rzw}$  - tolerancja rzeczywista otworu /wałka/,

$w/o/$  - krzywa nośności wałka /otworu/,  $W_{w+o/}$  - obszar zmian wymiaru wałka i otworu spowodowany zmianami wilgotności materiału, N - wymiar nominalny, A - dolny wymiar graniczny wałka

skrajni zarysu nierówności do tolerancji wykonania będzie większy. Zupełnie inaczej niż to ma miejsce w poprzednio rozpatrywanym przypadku odnoszącym się do technologii budowy maszyn.

Wychodząc z hipotezy poszukiwano prostych sposobów mogących udowodnić jej zasadność. W tym celu postanowiono w oparciu o pewne uproszczenia rozważyć czy wpływ zmian wilgotności złącza w granicach  $\pm 2\%$  mieści się w obszarze skrajni zarysu nierówności powierzchni otworu i wałka. W oparciu o hipotezę, optymalnym rodzajem pasowania elementów złącza byłoby pasowanie mieszane zwykłe albo, biorąc pod uwagę przesunięcie krzywych nośności spowodowane naniesieniem kleju, lekko wciskane. Wykres luzów pasowania mieszane odmiany wciskanej 1, obrazuje Rys. 7.



Rys. 7 Wykres luzów nominalnych pasowania mieszanego odmiany wciskanej

Rozpatrując wpływ zmian wymiarowych złącza wykonanego z materiału anizotropowego higroskopijnego, spowodowanych oddziaływaniem wilgotności na nośność powierzchniową złącza, można by wyróżnić następujące trzy przypadki.

Przypadek I, gdy w połączeniu występuje jedynie przesunięcie pól tolerancji, bez zmiany wzajemnego położenia krzywych nośności. Przypadek występuje gdy:

$$\beta_o = \beta_w : \Delta W_o = \Delta W_w$$

Przypadek II, gdy końcowe luzy najmniejsze i największe ulegają zmniejszeniu. Krzywe nośności zbliżają się do siebie.

$$\beta_o < \beta_w : \beta_o = \beta_w : \beta_o < \beta_w$$

$$\Delta W_o = \Delta W_w : \Delta W_o < \Delta W_w : \Delta W_o < \Delta W_w$$

Przypadek III, gdy końcowe luzy /L k. min.L k. max ulegają zwiększeniu o krzywe nośności oddalają się od siebie:

$$\beta_o = \beta_w : \beta_o > \beta_w : \beta_o > \beta_w ,$$

$$\Delta W_o > \Delta W_w : \Delta W_o = \Delta W_w : \Delta W_o > \Delta W_w .$$

Wpływ zmian wilgotności na zmianę rodzajów pasowań, wyrażonych za pomocą wartości luzów końcowych lub tolerancji pasowania, można obliczyć wg Marzyskiego, Staniszewskiego i in. /1978/

$$Lk/\text{maks, min}/ = 0,01 N_p / \beta_o \Delta W_o - \beta_w \Delta W_w / + \\ + L_p/\text{maks, min}/ \quad / \text{mm}/$$

gdzie oprócz znanych wielkości:  $N_p$ -wymiar początkowy otworu i wałka:

$\beta_o, \beta_w$  - rozszerzalność liniowa "otworu" /wałka/.

Obliczenie luzów przeprowadzono w oparciu o następujące założenia:

$N_p = 8, \Delta W_o = \Delta W_w = 4 \%$ .  $L_{\text{maks}} = 0,2$ .  $L_{\text{min}} = -0,2$ .

Przyjęcie w obliczeniach udziału skrajni zarysu H w obszarze tolerancji T, dokonano w oparciu o badania wstępne wykonane przez autorów. Badania te polegały na pomiarach i obliczeniach wartości tolerancji rzeczywistych  $/T_{rz}/$  i chropowatości powierzchni na podstawie badań połączeń czopowych. W oparciu o uzyskane dane liczbowe stwierdzono, że skrajnia zarysu nierówności powierzchni, w przybliżeniu wałka i otworu, w obszarze tolerancji rzeczywistych wynosi:

$$H = 1,2 T_{rz}$$

W wyniku przeprowadzonych obliczeń stwierdzono, że średnie luzy pasowania zmieniły się nieznacznie, w granicach  $\pm 0,05$ . Nie zmieniają one w sposób istotny początkowego wzajemnego położenia krzywych nośności. Można tym samym twierdzić, że nie obniży to początkowej nośności średniej złączy. Luzy końcowe skrajne wynoszą 0,25 co oznaczałoby całkowite wyczerpanie się zapasu nośności złącza, gdyby nie rola elastycznej skrajni zarysu nierówności powierzchni styku wałka i otworu. Skrajnie zarysu nierówności jednak **przekraczają** graniczne położenia o wartość 0,01. Oznacza to, że luz minimalny pomiędzy powierzchniami styku wyniesie - 0,01, luz maksymalny zaś + 0,01. Tak małe luzy skrajne nie powinny i jak wiadomo nie powodują w praktyce niszczenia połączeń.

Potwierdzeniem dużego udziału pasma chropowatości w obszarze tolerancji są wyniki badań Szostaka /10/. Badał on wpływ parametrów obróbki wiertarko-frezarkę na dokładność frezowania gniazd w mate-

riale drzewnym a więc klasycznym przypadku materiału anizotropowego higroskopijnego.

Wysokość chropowatości  $R_z$  wynosiła  $R_z = 0,143$ .

Dla tych samych warunków obróbki wymiarowa dokładność frezowania  $/G/$  wynosiła  $G = 0,08$ .

Potwierdzeniem zaś istotnego wpływu chropowatości powierzchni na wytrzymałość złącza klejowego są wyniki badań Katony i Battermana /5/. Zastosowali oni matematyczny program do przeprowadzenia analizy naprężeń występujących w chropowatościach przylegających powierzchni modelowych złączy prostych i czołowych, wykonanych z materiałów ceramicznych. Wyniki tych badań uogólnia następujące stwierdzenie: stopień chropowatości powierzchni jest krytycznym parametrem wytrzymałości złącza klejowego.

Reasumując można stwierdzić, że przeprowadzone rozważania i wstępna analiza literatury przedmiotu potwierdzają hipotezę o nośności i trwałości połączeń kojarzonych wg pasowań mieszanych i włączonych roli skrajni zarysu nierówności powierzchni wałka i otworu.

#### WNIOSKI

W oparciu o wyniki analizy wstępnej dotyczącej roli struktury geometrycznej powierzchni w wybranych dziedzinach jej stosowania można sformułować następujące wnioski:

- 1/ model nominalny kontaktu powierzchni różni się w sposób zdecydowany od modelu rzeczywistego, co może mieć różny sens fizyczny w różnych dziedzinach techniki,
- 2/ optymalizację użytkową i technologiczną połączeń należy prowadzić jedynie w oparciu o rzeczywisty model kontaktu powierzchni styku,
- 3/ charakter rzeczywistych powierzchni można kształtować stosownie do potrzeb użytkowych, technologicznych i ozdobnych.

#### BIBLIOGRAFIA

1. Aszkanazi E.K., Ganow Z.W. 1972 Anizotropia konstrukcyjnych materiałów, "Maszynostrojenije", Leningrad

2. Bódzioch J., Badania możliwości wykorzystania zmienności współczynnika tarcia do oceny chropowatości powierzchni. Referaty Instytutu Obróbki Skrawaniem, Kraków 1967 nr 26
3. Bowden F.P., Tabor D., Friction and Lubrication of Solids, 2. Ed. Clarendon Press, Oxford 1964
4. Burkiewicz T., Badania połysku powłok w wyrobach drzewnych, Maszynopis pracy doktorskiej w Politechnice Gdańskiej 1965
5. Katona T.E., Battermann S.C., 1983 Surface roughness effects on the stress analysis of adhesive joints, Inst. I., Adhesion and Adhesives 1983 Vol. 3, nr 2
6. Kragielski W., Molekularno-mechaniczeskaja teorija trjenija, W: Trienije i iznos w maszynach Izdat, ANSSR Moskwa 1949 nr III
7. Maroczkin W.N., Razczot koeficyjenta trenija primienitielno k dwom szerochowatym powierzchnostijam, W: Trienije i iznos w maszynach Izdat, ANSSR Moskwa 1958 nr XII
8. Pahlitzesch G., Dziobek K., 1965 Die Beurteilung bearbeiteter Holzoberflächen /I i II/ Holztechnologie, 1965 T. 6 nr 3 i 4
9. Sadowski A., Miernik E., Sobol J., Metrologia długości i kąta, Warszawa 1978 WNT
10. Szostak M., Wpływ parametrów obróbki wiertarkofrezarkę na dokładność frezowania gniazd w materiale drzewnym, Prace Instytutu Technologii Drewna 1980 R. XXVII z. 3/4/93/96
11. Szulc S., Gładkość powierzchni w budowie maszyn, Mechanik. Poradnik techniczny Warszawa 1958 T. 3, cz. 2/3 PWT

РОЛЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТИ В ВЫБРАННЫХ  
ОБЛАСТЯХ ЕЕ ПРИМЕНЕНИЯ

Р е з ю м е

В статье представлен вступительный анализ на тему роли геометрической структуры поверхности в несвязных элементах, а также в смешанных и прессовых соединениях. Сформулированные выводы указывают на потребность проведения дальнейших исследований в области формирования поверхностей и ее определение относительно к потребительским, технологическим и декоративным нуждам.