

Paweł MACIOŁKA¹

WYKORZYSTANIE NOŚNOŚCI POWIERZCHNI DO UZYSKANIA CHARAKTERYSTYKI STYKU POMIĘDZY PRZEDMIOTEM I USTALACZEM POŁOŻENIA

W artykule omówiono modelowanie styku przedmiotu i ustalacza (zderzaka) w procesie ustalania położenia. Przedstawiono podejście do modelowania styku dla dwóch suchych powierzchni, z których jedna jest chropowata i odkształcalna a druga jest powierzchnią teoretycznie płaską i sztywną. Model geometryczny styku zbudowano w oparciu o powierzchnię krzywą nośności uzyskiwaną z bezpośrednich pomiarów. O poprawności przedstawionego podejścia do modelowania z pomocą MES świadczy dobra zgodność uzyskiwanych wyników z eksperymentem, szczególnie udokumentowanym w dysertacji Z.Makodońskiego, dla styku dwóch szlifowanych powierzchni ze stali C45. Ponadto proponowanym sposobem modelowania styku posłużono się do określenia wpływu nośności na charakterystykę styku dla stopu aluminium EN AW-5754 obrobionego szlifowaniem i frezowaniem.

1. WPROWADZENIE

Ustalanie położenia przedmiotu w przyrządach obróbkowych związane jest z doprowadzeniem do styku powierzchni przedmiotu i elementów oporowych (zderzaków), nazywanych dalej ustalaczami położenia. Wartość dopuszczalnego obciążenia styku jest ściśle związana z potrzebami technologicznymi. Dla określenia tych potrzeb i powiązania ich z wymogami pomiarowymi konieczne jest dokładne poznanie charakterystyki styku, tzn. zbliżenia powierzchni w funkcji obciążenia. Charakterystyka zbliżenia zależna jest w znacznej mierze od odkształceń w przypowierzchniowym obszarze styku, zawierającym mikronierówności należące do chropowatej powierzchni. Geometria chropowatych powierzchni, opisana nośnością powierzchni jest nieliniowa i powoduje, że charakterystyka zbliżenia również jest nieliniowa. Podczas styku dochodzi do mikrometrycznych odkształceń na skutek sił obciążających powierzchnię. Odkształcenia w styku zależne są od materiału ustalanego przedmiotu i ustalacza (modułu Younga, stałej Poissona, granicy plastyczności, wytrzymałości na rozciąganie), sumy krzywizn stykających się ciał i od stanu naprężeń [12]. Na ogół ustalacze są twarde w stosunku do ustalanych przedmiotów, z uwagi na zapewnienie ich trwałości i powtarzalności procesów ustalania położenia. W dalszej części artykułu przedstawiono podejście do modelowania styku dla dwóch suchych

¹ Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechnika Wroclawska,

powierzchni, z których jedna jest chropowata i odkształcalna a druga jest powierzchnią teoretycznie płaską i sztywną.

2. PRZEGLĄD MODELI STYKU

Od momentu zapoczątkowania przez Hertza badań nad stykiem między dwoma elastycznymi sferami [1], powstało wiele prac wykorzystujących teorię Hertza. Dzięki temu powstały modele elasto-plastyczne, plastyczne, jak również modele zapewniające ciągłość pomiędzy pośrednimi stanami naprężeń. Ze względu na geometrię stykających się powierzchni, zostały rozwinięte modele styku począwszy od styku pomiędzy sferami, poprzez badania styku pomiędzy gładką sferą i gładką płaską powierzchnią w pełnym zakresie odkształceń [5] do modelowania tarcia pomiędzy chropowatymi powierzchniami. W tym ostatnim przypadku wykorzystano styk pomiędzy sferyczną a płaską powierzchnią, z uwzględnieniem podstawowych parametrów chropowatości [4]. Opracowane modele dotyczyły też styku pomiędzy sferyczną a płaską powierzchnią, z uwzględnieniem parametrów opisujących nośność powierzchni [7].

W obecnie rozwijanych modelach styku wykorzystanie obliczeń Hertza jest sprawdzonym uproszczeniem w zakresie odkształceń elastycznych i dlatego między innymi jest chętnie stosowane w analizie styku chropowatych powierzchni, rozpatrywanych z punktu widzenia pojedynczych mikronierówności [13, 14]. W oparciu o teorię Hertza prace nad stykiem chropowatych powierzchni zapoczątkowali J.A.Greenwood i J.B.P.Williamson [2]. Model GT [3] potwierdza słuszność założenia, że kontakt pomiędzy dwoma chropowatymi powierzchniami może być zastąpiony równoważnym stykiem powierzchni sferycznej i płaskiej.

Ciągły rozwój modeli styku związany jest z rosnącymi możliwościami dokładnych obliczeń i coraz pełniejszym poznawaniem warunków pracy urządzeń. Rozszerzanie zakresu analiz o nowe parametry styku zwiększa złożoność obliczeń. Uwzględnienie chropowatości powierzchni w analizach styku mocno komplikuje obliczenia analityczne i wymusza wspomaganie zaawansowanymi metodami obliczeniowymi, np. MES. Do analizy styku najczęściej wybierane są takie parametry jak: siła pomiędzy stykającymi się powierzchniami, rzeczywista powierzchnia styku, rzeczywiste ciśnienie w styku, oraz zbliżenie powierzchni. W pracach nad modelowaniem styku powierzchni sferycznych, jako kolejny z parametrów styku wprowadzono wartość krytycznego zbliżenia [6], opisującego dopuszczalne odkształcenie. W zaawansowanych pracach, np. nad określeniem chwili zmiany stanu naprężenia w tzw. modelach elastoplastycznych, styk dodatkowo charakteryzuje współczynnik plastyczności [2], który dokładnie wyznaczono w pracy [8].

Daleko zaawansowane badania styku dotyczą zużycia warstwy materiału, formowania powierzchni w wyniku jej zużycia [17] a także określenia stabilności kontaktu z tarciem [18]. Istotą jest wyjaśnienie zjawisk towarzyszących pękaniu materiałów. Budowane są modele rozwoju uszkodzeń tj. modele stref mikroszczelin w zapoczątkowanych i rozwijających się pęknięciach przedmiotów. Zaawansowane modele rozwoju uszkodzeń obejmują analizy naprężeń ciernych pod wpływem naprężenia normalnego [19] lub obciążenia temperaturowego [20].

3. MODEL STYKU DLA POTRZEB USTALANIA POŁOŻENIA

3.1. KONCEPCJA MODELU

Model styku powstał w oparciu o rzeczywiste cechy geometryczne przedmiotów, w których swój udział mają właściwości powierzchni i rdzenia materiału. Chropowata powierzchnia i rdzeń materiału wzajemnie oddziałują na siebie i dlatego w modelu styku chropowata powierzchnia jest integralną częścią rdzenia materiału. Opracowany model uwzględnia własności chropowatości powierzchni poprzez wrysowanie w geometrię przedmiotu zmian chropowatości wg nośności powierzchni w funkcji odległości od najwyższego wierzchołka.

Koncepcja opracowanego modelu styku dla potrzeb ustalania położenia oparta jest o proste i w miarę szybkie wyznaczenie charakterystyki styku obciążonych powierzchni. Wykorzystuje ona metodę obliczeniową MES oraz charakterystykę nośności powierzchni, wyznaczaną z pomocą szybkiej i dokładnej techniki trójwymiarowego skanowania (pomiar 3D). Charakterystycznym dla opracowanego modelu jest to, że zbliżenie mierzone jest od momentu rozpoczęcia się odkształceń najwyższej mikronierówności chropowatej powierzchni. Odkształcenia wywołane są przez drugą powierzchnię o parametrach zbliżonych do powierzchni teoretycznie płaskiej. Nowy model daje możliwość wykorzystania nośności chropowatych powierzchni, która na ogół opisywana jest rozszerzonymi parametrami chropowatości, np. parametry funkcjonalne objętości V wg ISO 25178-2 (PN-EN ISO 25178-6:2010) lub Sk wg ISO 13565-2 [16].

Proponowany model może być przydatny w praktyce przemysłowej, ponieważ da się zrealizować szybko i przy małym nakładzie pracy a pomiary 3D stają się już standardem. Z tego typu rozwiązaniami pomiarowymi można się spotkać w aplikacjach dotyczących kształtowania plastycznego materiałów [9]. Model ten może też być użyty do określenia charakterystyki styku przy posługiwaniu się zmodyfikowanymi pomiarami, zastępującymi pomiary 3D oraz może być wykorzystany w pracach nad dalszym rozwojem matematycznego modelu styku, który opisano w [10].

3.2. WŁAŚCIWOŚCI MATERIAŁÓW UŻYTYCH W MODELU MES

Szczegóły modelu zostaną omówione na przykładzie styku dwóch płaskich powierzchni, z których jedna jest chropowata, miękka, aluminiowa, powstała w wyniku frezowania stopu aluminium EN AW-5754 a druga teoretycznie sztywna i gładka, reprezentująca nieporównywalnie gładszą, szlifowaną, twardą stal C45. Do sprawdzenia poprawności działania modelu użyto szlifowanych próbek ze stali C45, pochodzących z dwóch różnych partii, o chropowatości $Sz=4.1\mu m$. Zastosowane w modelu parametry stopu aluminium EN AW-5754 i stali C45 zebrano w tabeli.1.

W modelu założono, że aluminium jest anizotropowe. Chropowatość aluminiowej powierzchni $Sz=5.77\mu m$ uzyskano przez obróbkę frezem S420063-12 firmy SAU,

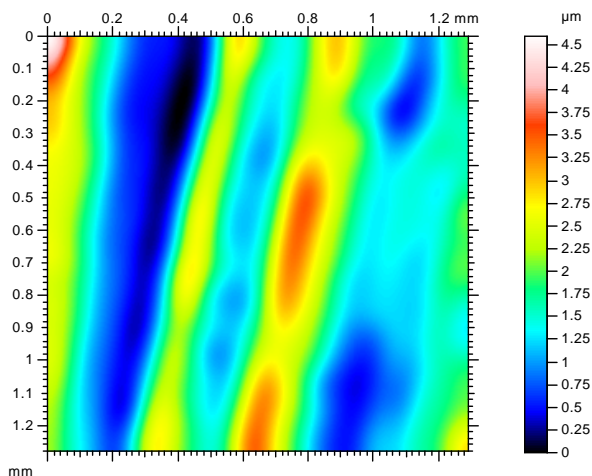
Tabela 1. Właściwości mechaniczne materiału EN AW-5754 (PA11) wg PN-EN485-2:2009 w stanie H111 oraz stali C45 wg [11] zgodne z PN-EN10083-2:2008 w stanie +N
 Table 1. Mechanical properties of EN AW-5754 (PA11), according to PN-EN485-2:2009 with the H111 temper and steel C45, according to [11] in accordance with PN-EN10083-2:2008 in the +N condition

		EN AW-5754 (PA11)	Stal gat.C45
Moduł Younga	E	70 GPa	207 GPa
Umowna granica plastyczności	$R_{p0.2}, (R_{eH})$	76 MPa	(375) MPa
Granica wytrzymałości na rozciąganie	R_m	209 MPa	625 MPa
Współczynnik Poissona	ν	0.33	0.30
Wydłużenie przy zerwaniu	$A_{50}, (\epsilon_u)$	16%.	(19%)
Twardość w skali Brinella (Rockwella)	HBW(HRC)	52	(59)

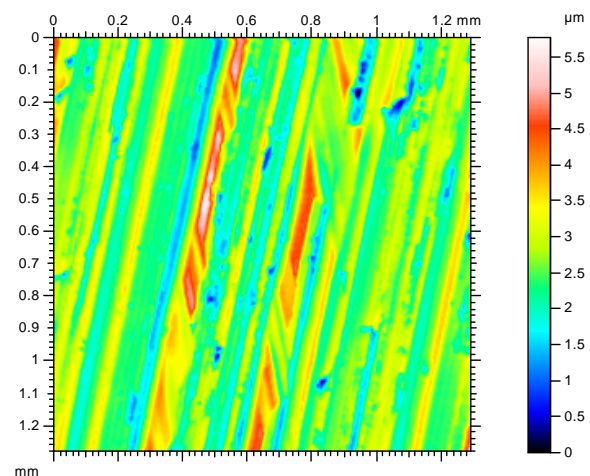
pięciopłytkowym $\phi 74$, z płytkami SEKW1204AFSN.Z52 dla parametrów $n=1000$ obr/min i $V_f=1000$ mm/min. Do pomiarów stereometrii powierzchni EN AW-5754 zastosowano profilografometr stacjonarny TalySurf 120L a dla stali 45 - TalySurf CCILite. Uzyskane z obu urządzeń wyniki pomiarów falistości przedstawiono odpowiednio na rys. 1a i 1c, zaś chropowatości na rys. 1b i 1d.

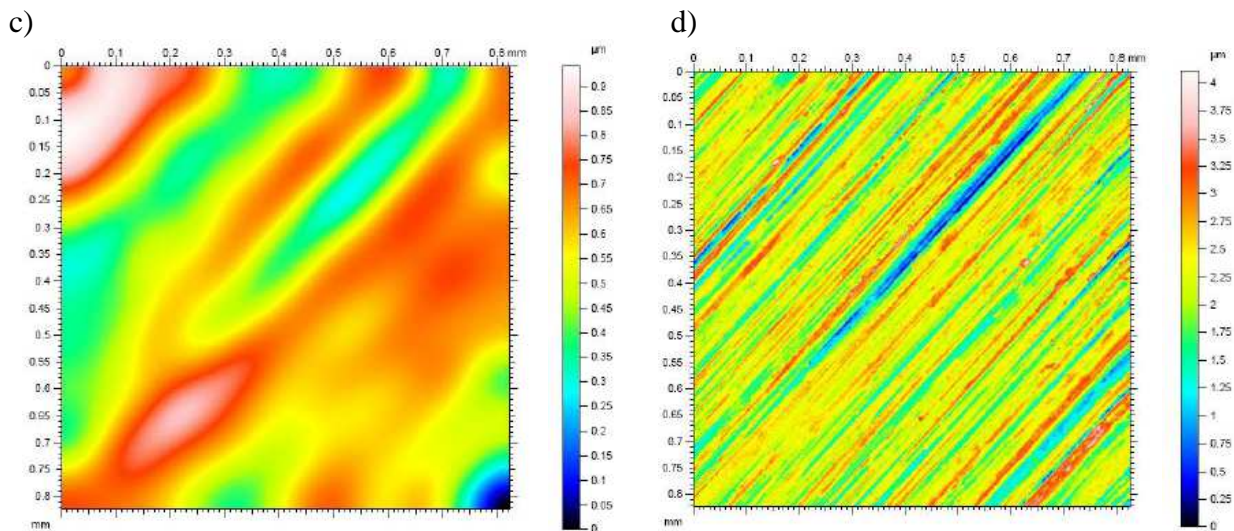
W celu zminimalizowania wpływu odkształceń, spowodowanych falistością powierzchni, na potrzeby planowanego eksperymentu, przyjęto powierzchnię nominalną styku równą 1mm^2 . Wielkość tego obszaru jest dodatkowo zdeterminowana możliwościami profilografometru TalySurf 120L jak: zakres pomiarowy, liczba zebranych danych oraz czas pomiarowy.

a)



b)

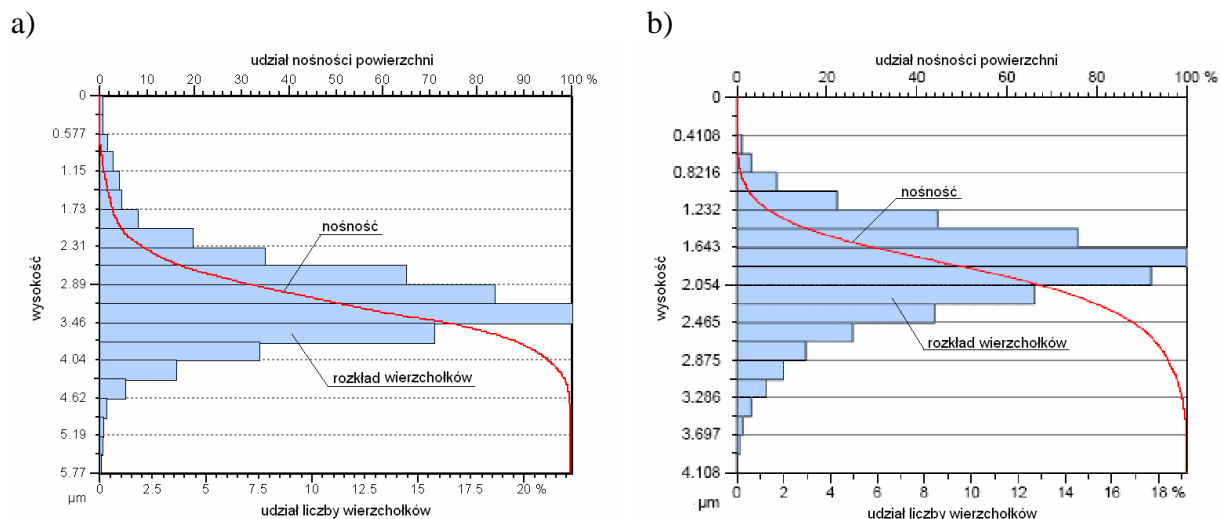




Rys. 1. Mapy warstwowe falistości i chropowatości: a) i b) aluminium EN AW-5754 po obróbce frezowaniem - pomiary na TalySurf 120L (256x256pkt), c) i d) stal C45 po obróbce szlifowaniem - pomiary na TalySurf CCILite (1024x1024pkt)

Fig. 1. Surface textures of waviness and roughness: a) & b) aluminum EN AW-5754 after milling - measured with TalySurf 120L (256x256pixels), c) & d) steel C45 after grinding - measured with TalySurf CCILite (1024x1024pixels)

Dla określonej powierzchni nominalnej i odcinka elementarnego 0.25 mm wyznaczono nośności oraz rozkłady liczby wierzchołków metodą zliczania ziaren (rys. 2a dla EN AW-5754 i rys. 2b dla stali C45).



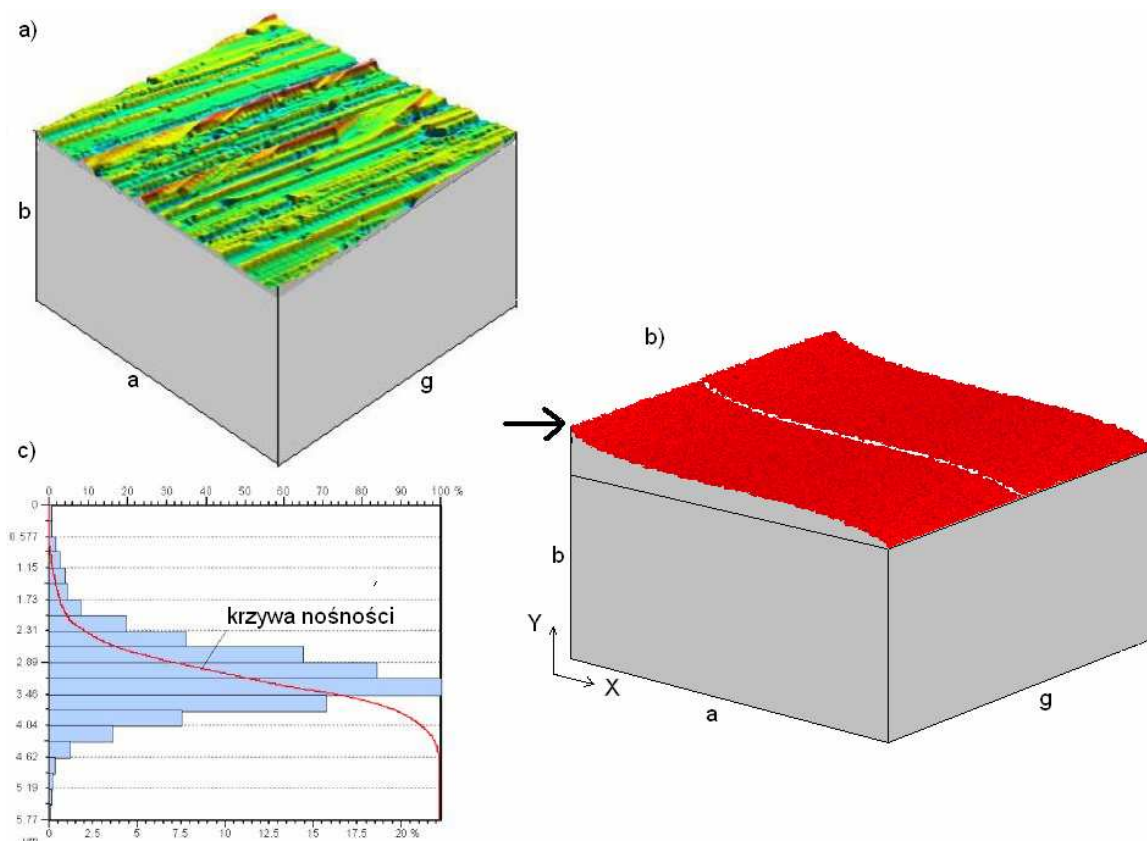
Rys. 2. Nośność powierzchni i rozkład mikronierówności a) stopu aluminium EN AW-5754 o powierzchni frezowanej i b) szlifowanej stali C45

Fig. 2. Bearing surface curve and topography height distribution a) aluminum alloy EN AW-5754 with milled surfaces and b) grinded steel C45

Wykresy krzywej nośności zawierają informacje wykorzystywane do opisu powierzchni parametrami 3D. Parametry 3D w porównaniu do 2D zawierają dużo więcej informacji o powierzchni [15] i dlatego krzywa nośności jest przydatna do dokładnej oceny jakości powierzchni przedmiotów bazowanych. Na rys. 2 krzywe nośności z zakresów udziału nośności powierzchni pomiędzy ok. 0-10% i 90-100%, zawierają odpowiednio informacje o wierzchołkach i wgłębieniach. Z krzywej nośności na rys. 2a wstępnie można wywnioskować, że powierzchnia frezowana ma większy udział nośny mikronierówności niż wgłębień a powierzchnia szlifowana na rys. 2b odwrotnie. Taka tendencja dla powierzchni po tego typu obróbkach nie jest regułą, ale dzięki porównaniu przebiegu krzywych nośności można określić, która powierzchnia spowoduje większe odkształcenia stykowe, a tym samym większy błąd bazowania.

3.3. BUDOWA MODELU MES

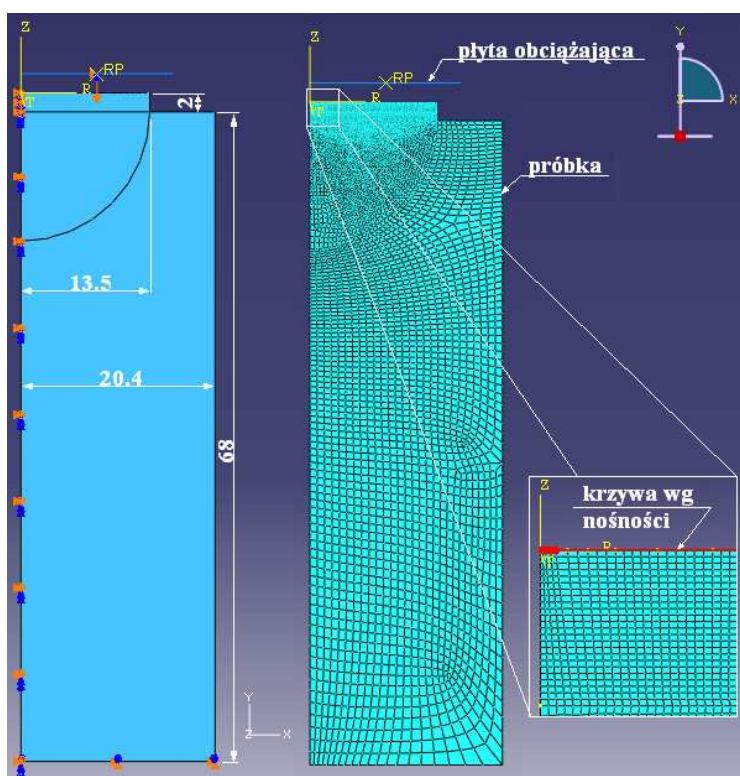
Model zbudowano w płaskim układzie współrzędnych z uwzględnieniem grubości próbki „g” (rys. 3b).



Rys. 3. Próbką a) mierzona b) geometryczny model próbki c) krzywa nośności
 Fig. 3. Sample, a) test piece; b) geometric model; c) surface bearing ratio curve

Krzywą nośności c) uzyskano z bezpośrednich pomiarów próbki a) o wymiarach $a \times b \times g$. W efekcie powstał geometryczny model próbki b) o tych samych wymiarach $a \times b \times g$. Kształt górnej powierzchni modelu geometrycznego próbki jest dokładnym odzwierciedleniem krzywej nośności, rozciągniętej na całą grubość „g”. **Uzyskano w ten sposób próbkę o niepłaskiej powierzchni, równoważnej odkształceniowo powierzchni próbki z rzeczywistym rozkładem chropowatości.** Unika się w ten sposób konieczność szczegółowego modelowania chropowatości, co jest trudne z uwagi na brak pełnej wiedzy w tym zakresie.

Ze względu na symetrię przedmiotu bazowanego względem osi OY, zamodelowano jego jedną połowę. Model geometryczny z warunkami brzegowymi i model dyskretny przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Model geometryczny z warunkami brzegowymi i model dyskretny z wyszczególnieniem powierzchni zgodnej z krzywą nośności
 Fig. 4. Geometric model with boundary conditions and discrete model with detail of the area in accordance with the load curve

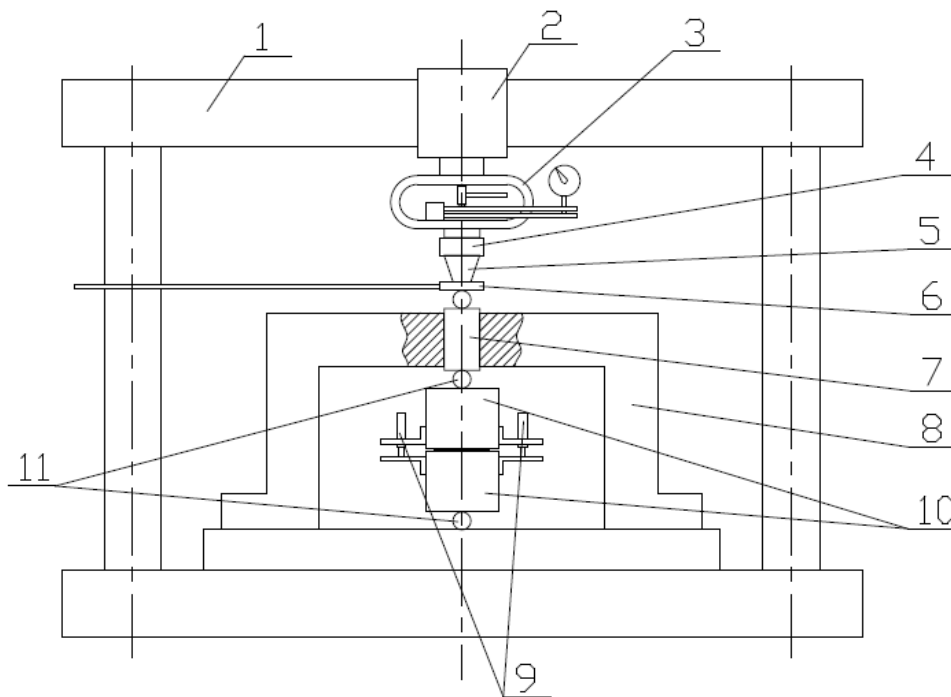
Więzy osi symetrii OY to: $U1=U3=UR2=0$ (YASYMM), a dolnej powierzchni, która jest utwierdzona: $U1=U2=UR3=0$ (ZASYMM). Górna powierzchnia (zaznaczona na rys. 4 kolorem czerwonym) ma kształt krzywej nośności (rys. 2a), a obciążenie w węzłach powierzchni wywołane zostało poprzez przemieszczenie sztywnej płyty w -OY. W modelu zastosowano liniowe elementy czworoboczne CPE4R oraz liniowe trójkątne CPE3. Łącznie model zawiera: 9099 węzłów, 8932 elementów (w tym: 8862 CPE4R i 70 CPE3).

Analizę przeprowadzono w programie ABAQUS/Standard w dwóch krokach

o procedurze: „Static, General”. W obu krokach przemieszczano sztywną płytę w kierunku osi -OY. W pierwszym kroku sztywna płyta zbliża się do próbki do momentu rozpoczęcia styku. W drugim kroku rozpoczyna się obciążanie styku i trwa do czasu osiągnięcia przez sztywną płytę przemieszczenia równego $-5\mu\text{m}$. Interakcje między powierzchniami są typu: „hard contact” i nie uwzględniają tarcia.

4. STANOWISKO I ZASADA POMIARU ZBLIŻENIA ZASTOSOWANA W PRACY MAKODOŃSKIEGO [10]

Pomiary wykonano w komorze termostaticznej o ustalonej temperaturze $\pm 0.5^\circ\text{C}$. Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Schemat stanowiska pomiarowego użytego w badaniach Makodońskiego [10].
Fig. 5. Diagram of the measurement device used in the research work by Makodonski [10].

Pomiar siły wykonano z dokładnością 30N przy pomocy siłomierza pałkowego 3 zamocowanego poprzez uchwyt 2 do ramy przesuwnej 1. Obciążenie normalne próbki 10 uzyskano przy pomocy obrotu nakrętki 4 poprzez stożek 5, element pośredniczący 6 oraz trzpień cylindryczny 7 - suwliwie spasowany w ramce 8. Element pośredniczący 6 zapobiega przeniesieniu na badane próbki 10 momentu tarcia pomiędzy nakrętką 4 a stożkiem 5. Ponadto aby zapewnić wyłącznie siły ściskające, próbki 10 obciążono poprzez kulki 11. Pomiar zbliżenia wykonano przy użyciu czterech czujników indukcyjnych

dotykowych 9 typVIS, z których każdy miał przydzielony mostek pomiarowy typu KWS firmy Hottinger. Przed pomiarami czujniki wraz z mostkami wzorcowano na profilografie firmy Karl-Zeiss-Jena w dwóch zakresach: $0-5\mu\text{m} \pm 0.05\mu\text{m}$ i $0-10\mu\text{m} \pm 0.1\mu\text{m}$. Czujniki rozmieszczone były symetrycznie po każdej stronie na obwodzie próbek i w jednakowej odległości od osi symetrii próbek tak aby zapewnić, że proste łączące wektory przeciwległych czujników przecinały się w osi symetrii próbek. W ten sposób zapewniono, że średnie wskazania przeciwległych czujników były sobie równe. Wyniki pomiarów przedstawiono na rys. 6 (linia przerywana niebieska - odkształcenia stykowe, przerywana czerwona całkowite).

5. WYNIKI MODELOWANIA

Głównym zamiarem pracy było stworzenie możliwości wyznaczania charakterystyki styku jako zbliżenie w funkcji obciążenia dla powierzchni o znanej nośności. Charakterystyka styku jest podstawową daną wejściową w modelowaniu błędów podczas bazowania złożonego przedmiotu.

5.1. SPOSÓB WYZNACZENIA CHARAKTERYSTYKI STYKU

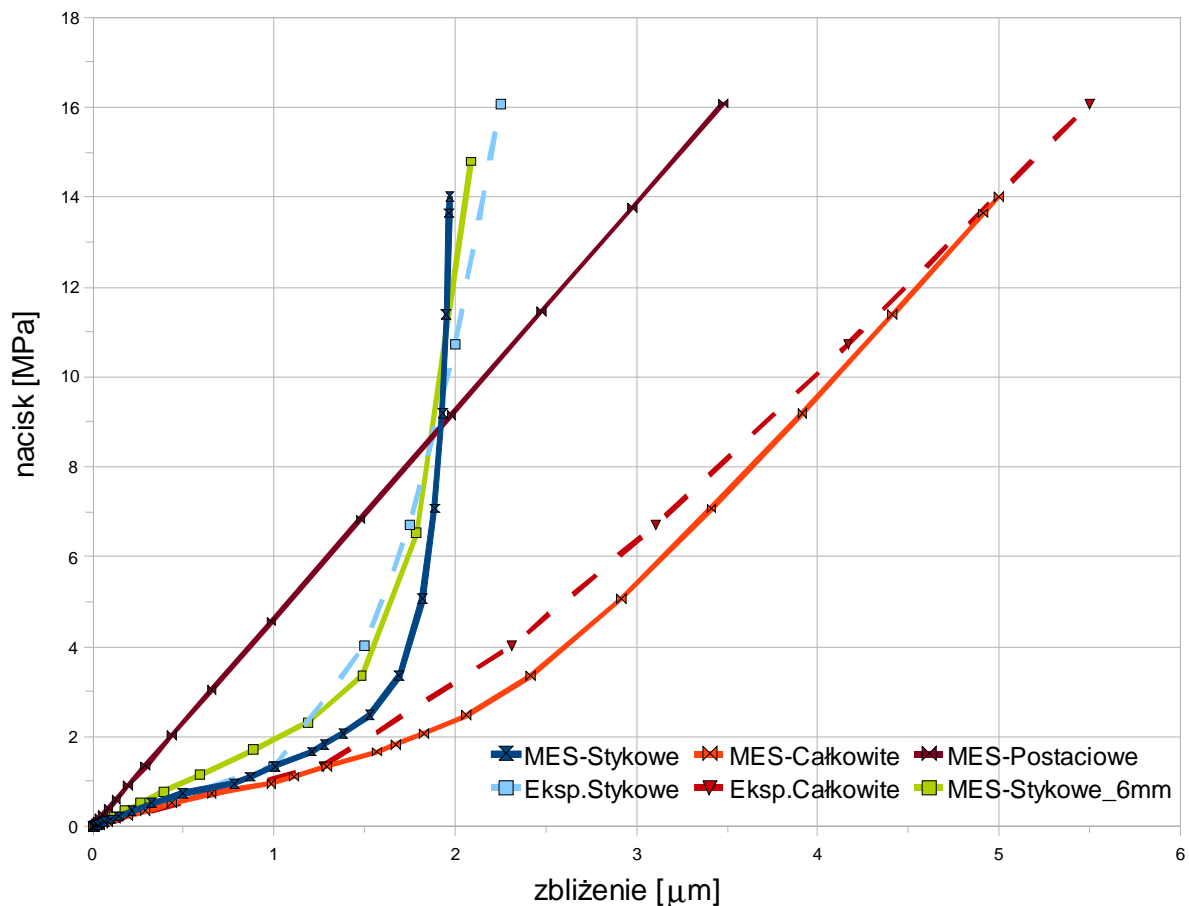
Modelowanie styku dwóch płaskich powierzchni przeprowadzono w dwóch etapach. W pierwszym sprawdzono wyniki z eksperymentem dla dwóch podobnych próbek oraz wyciągnięto wnioski i zastosowano je do kolejnego etapu, w którym podjęto próbę modelowania styku różnych próbek. W wyniku modelowania przedstawiono wpływ nośności na charakterystykę styku przedmiotów bazowanych.

W pierwszym etapie sprawdzenia modelu posłużono się wynikami pomiarów z eksperymentu szczegółowo udokumentowanego w dysertacji Z.Makodońskiego [10]. Zamodelowano styk dwóch chropowatych powierzchni uzyskanych po szlifowaniu stali C45 (Stal – Stal). Z powodu braku informacji o nośności dla szlifowanej stali użytej w eksperymencie Makodońskiego na potrzeby porównania wyników zmierzono zmiany nośności innej szlifowanej próbki stalowej gatunku stali C45 (rys.1d, rys.2b) a własności mechaniczne przyjęto wg pomiarów [11] i wg PN-93/H-84019 (zebrane w tabeli 1). Sądząc po tym, że obie próbki są tego samego gatunku stali i mierzone powierzchnie są wykonane tą samą technologią, tak że ich tekstura jest podobna i maksymalna chropowatość $S_z=4\mu\text{m}$, użyte parametry z dużym prawdopodobieństwem mogą być zbliżone do parametrów próbek użytych w eksperymencie Makodońskiego.

Podczas modelowania dwóch podobnych próbek (bez uwzględnienia odkształceń w styku), z których jedna obciąża drugą, zauważono, że aby uwzględnić odkształcenia postaciowe obu próbek wystarczy zbudować model składający się z równoważnej próbki o dwukrotnej grubości próbki obciążonej sztywną płytą przemieszczaną prostopadle do próbki. Wykorzystano to do sprawdzenia modelu i przyjęto zasadę, że model uwzględniający odkształcenia styku może stanowić reprezentatywną próbkę z teoretycznie sztywną i płaską powierzchnią. To spowodowało, że w pierwszym etapie zamiast modelowania dwóch identycznych próbek (z których jedna obciąża drugą) wprowadzono reprezentatywną próbkę

zastępczą o dwukrotnie zwiększonej grubości. W ten sposób sprowadzono model z stykiem pomiędzy dwoma próbkami o zbliżonych właściwościach do modelu próbki reprezentatywnej obciążonej teoretycznie sztywną i płaską powierzchnią.

Również na potrzeby sprawdzenia modelu dodatkowo zamodelowano próbki bez uwzględnienia nośności. Sprawdzono w ten sposób wpływ odkształceń postaciowych próbek (przebieg liniowy na rys. 6) na charakterystykę zbliżenia i uzyskano przebieg odkształceń stykowych (niebieska linia na rys. 6). Podobny efekt możemy uzyskać modelując samą warstwę styku, bez uwzględniania grubości próbek, ale utrudnieniem staje się odpowiednie oszacowanie grubości tej warstwy. Zastosowanie analitycznego wyznaczenia grubości warstwy wierzchniej po nagniataniu tak jak w pracy [12] związane jest z trudnościami, których na tym etapie pracy chciano pominąć. Dlatego oszacowanie zrobiono iteracyjnie zwiększając grubość aż do momentu uzyskania wyników zgodnych z eksperymentem.



Rys. 6. Porównanie modelu MES z eksperymentem Z.Makodońskiego dla stali szlifowanej C45
 Fig. 6. Comparison of the FEM model with the experiment by Z.Makodońskiego for the grinded steel C45

Odkształcenia oznaczone linią czerwoną reprezentują wszystkie odkształcenia podczas obciążenia układu, w tym odkształcenia stykowe badanych powierzchni. Po ich

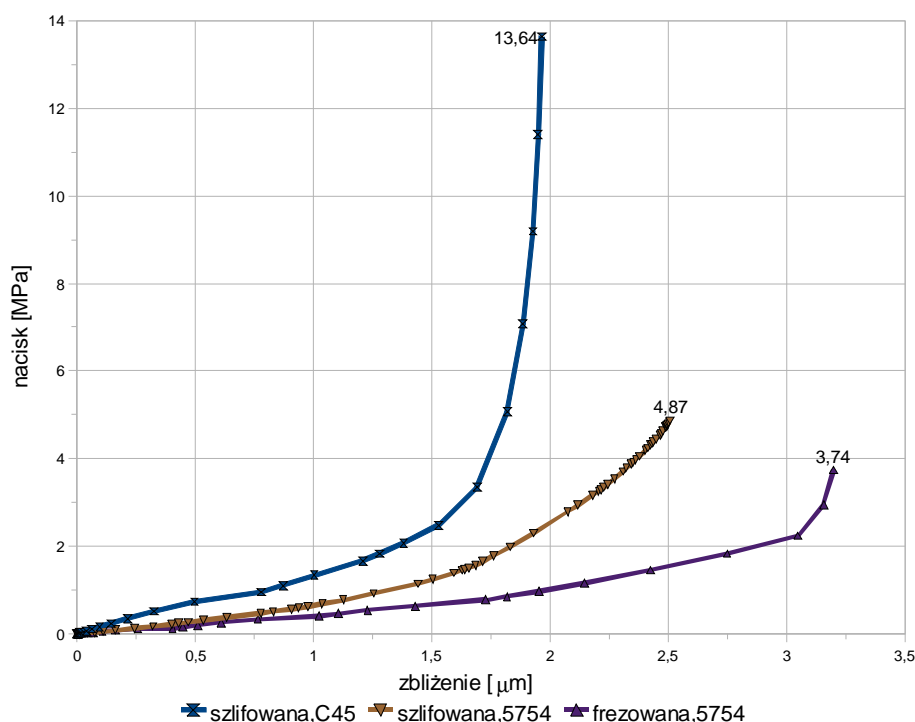
odseparowaniu uzyskujemy odkształcenia stykowe oznaczone linią niebieską. Maksymalna różnica pomiędzy obliczonym zbliżeniem powierzchni a eksperymentem nie przekracza $0.4 \mu\text{m}$. Wpływ na tą różnicę może mieć pewna tolerancja właściwości materiału stosowanego w eksperymencie oraz dokładność wykonania i pomiarów próbek.

Lepsze przybliżenie obliczonych odkształceń stykowych dla próbek ze stali C45 z eksperymentem uzyskano dla modelu z oszacowaniem grubości warstwy styku równej $6 \mu\text{m}$ (linia zielona rys.6). Może to być związane z tym, że eksperyment i model nie odwzorowują identycznie miejsca pomiarów, które powinny znajdować się jak najbliżej styku. Inną przyczyną może być fakt, że model nie uwzględnia momentów gnących próbki, które w eksperymencie były monitorowane i badane dla wyciągnięcia średniej ze wskazań czterech czujników.

5.2. CHARAKTERYSTYKI STYKU POWIERZCHNI O RÓŻNYCH NOŚNOŚCIACH

Wstępne sprawdzenie i porównanie wyników pozwoliło przygotować wytyczne do dalszego modelowania oraz pomiarów weryfikujących model styku dla dwóch różnych materiałów.

Na rys. 7 przedstawiono wyniki modelowania, dla próbek ze stopu aluminium EN AW-5754 obrobionych przez szlifowanie i frezowanie.



Rys. 7. Wpływ nośności powierzchni na charakterystykę styku przedmiotów bazowanych ze stali C45 i stopu aluminium EN AW-5754
 Fig. 7. Influence of bearing surface ratio on the contact characteristic of the positioned parts of the C45 steel and aluminum alloy EN AW-5754

Wyniki nie zostały zweryfikowane eksperymentalnie, ale prezentując je chciano zasygnalizować wpływ nośności na charakterystykę styku przedmiotów bazowanych. Na wykresie widać, że mniejsza nośność próbek frezowanych w porównaniu do szlifowanych może spowodować nawet dwukrotny wzrost podatności styku (zbliżenia) na obciążenie zewnętrzne. Na wykresie można zauważyć różne maksymalne naciski. Są one związane z właściwościami materiału i rodzajem obróbki, które mają zasadniczy wpływ na różnice chropowatości Sz.

5.3. WYTYCZNE DO DALSZEJ WERYFIKACJI MODELU MES

Sprawdzenie działania proponowanego podejścia do budowy modelu na próbce stalowej prawdopodobnie nie zagwarantuje wykazania jego poprawnego działania dla próbek aluminiowych. Dlatego niezbędne jest wykonanie precyzyjnego stanowiska pomiarowego. Stanowisko musi zagwarantować uzyskanie dokładnych i powtarzalnych wyników w zakresie odkształceń stykowych. Jakość analiz i możliwość popełnienia błędów jest powiązana z możliwościami pomiarowymi i obliczeniowymi. Analiza styku opiera się głównie na obserwowaniu samych odkształceń stykowych powierzchni przygotowanej do badań. Poniżej wyszczególniono czynniki mogące zapewnić stabilne warunki analizy odkształceń stykowych:

- uwzględnienie całkowitych odkształceń układu: próbka - przyrząd pomiarowy, w celu odseparowania odkształceń postaciowych,
- miejsce pomiaru powinno znajdować się jak najbliżej styku,
- uwzględnienie oddziaływań naprężeń w styku na warstwę podpowierzchniową, w kierunku rdzenia materiału próbki, z uwagi na brak możliwości bezpośredniego mocowania czujników pomiarowych w pobliżu styku,
- wykonanie próbki o możliwie jednorodnych właściwościach, a pomiary powinny być wykonywane dla małej powierzchni (np. 1mm^2), w celu eliminacji błędu falistości po obróbce mechanicznej,
- odseparowanie odchyłki falistości od odchyłki kształtu powierzchni próbki badanej, w celu wyeliminowania strefy odkształceń spowodowanych falistością.

6. PODSUMOWANIE

Porównanie wyników obliczeń metodą MES z wynikami eksperymentu wykazało poprawne działanie proponowanego modelowania styku w zastosowaniu do wyznaczania charakterystyki styku. Wyznaczenie charakterystyki styku tą metodą nie stwarza większych trudności, sprowadza się bowiem (tylko) do pomiaru powierzchniowej nośności próbki i przeniesienia jej do systemu obliczeniowego MES, który na tej podstawie tworzy geometryczny model obliczeniowy styku. Model geometryczny i obliczenia MES uwzględniają rzeczywiste właściwości mechaniczne powierzchni uzyskiwane dzięki nowoczesnym i szybkim technikom pomiarowym. W wyniku wykorzystania tej techniki

pomiarowej i obliczeniowej można szybko wyznaczać charakterystykę styku, co może mieć zastosowanie w nadzorowaniu ustalania położenia w czasie rzeczywistym.

Z uwagi na planowaną budowę stanowiska pomiarowego do badań odkształceń stykowych autor przewiduje kontynuację prac nad modelowaniem charakterystyk odkształceniowych połączeń stykowych.

Praca powstała w ramach projektu AFFIX – „Aligning, Holding and Fixing of Flexible and Difficult to Handle Components” trwającego w latach 2006-2010 przy wsparciu z funduszy w ramach Szóstego Ramowego Programu Badawczego Unii Europejskiej (FP6-2004-NMP-NI4) oraz dzięki wsparciu Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach projektu „Ustalanie, chwytanie i mocowanie elementów elastycznych i trudnych do manipulowania”.

Obliczenia wykonano na komputerach Wrocławskiego Centrum Sieciowo-Superkomputerowego (<http://www.wcss.wroc.pl>), grant obliczeniowy Nr 0109

LITERATURA

- [1] HERTZ H., Über die Berührung fester elastischer Körper, Journal für die reine und angewandte, Mathematik 92, 1881, 156-171.
- [2] GREENWOOD J.A., WILLIAMSON J.B.P., Contact of nominally flat surfaces, Proc. R. Soc. London A, 295, 1966, 300-319.
- [3] GREENWOOD J.A., TRIPP J.H., The contact of two nominally flat rough surfaces, Proc. Inst. Mech. Eng. 185, 1971, 625-633.
- [4] KARPENKO Yu. A., AKAY A., A numerical model of friction between rough surfaces, Tribology International, 34, 2001, 531-545.
- [5] KOGUT L., ETSION I., Elastic-Plastic Contact Analysis of a Sphere and a Rigid Flat, Journal of Applied Mechanics, ASME SEPTEMBER 2002, 69, 2002, 657-662.
- [6] KOGUT L., ETSION I., A finite element based elastic-plastic model for the contact of rough surfaces, Tribol., Trans. 46, 2003, 383-390.
- [7] SELLGREN U., BJÖRKLUND S., ANDERSSON S., A finite element-based model of normal contact between rough surfaces, Wear 254, 2003, 1180-1188.
- [8] KADIN Y., KLIGERMAN Y., ETSION I., Unloading an elastic-plastic contact of rough surfaces, Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 54, 2006, 2652-2674.
- [9] GILMOUR K.R., PAUL S.J., BOYD M.R., ASHBRIDGE M.T.J., LEACOCK A.G., Modified 2D stylus profilometry and its application to frictional analyses in sheet metal forming operations, Tribology International, 32, 1999, 553-558.
- [10] MAKODOŃSKI Z., Matematyczny model styku i odkształceń dwóch rzeczywistych powierzchni płaskich, Praca doktorska, PWr., 1980.
- [11] JODŁOWSKI H., Metoda rozpoznawania odkształceń plastycznych w procesie obciążania stali wykazujących niestateczność materiałową, Praca doktorska, PK, 2007, data dostępu: 15.11.2010, http://bc.biblos.pk.edu.pl/bc/resources/PD/JodlowskiH/MetodaRozpoznawania/pdf/JodlowskiH_MetodaRozpoznawania.pdf
- [12] MAZUR T., Badania grubości warstwy wierzchniej odkształconej plastycznie po nagniataniu umacniającym, Praca doktorska, PRad., 2003.
- [13] ZAHOUANI H., SIDOROFF F., Rough surfaces and elasto-plastic contacts, C. R. Acad. Sci. Paris, t. 2, Série IV, 2001, 709-715.
- [14] ABDOA J., FARHANG K., Elastic-plastic contact model for rough surfaces based on plastic asperity concept, International Journal of Non-Linear Mechanics, 40, 2005, 495-506.
- [15] KUNDRAK J., GYANI K., BANA V., Roughness of ground and hard-turned surfaces on the basis of 3D parameters, The International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, 38/1-2, 2007, 110-119.
- [16] BLATEYRON F., New 3D Parameters and Filtration Techniques for Surface Metrology, JSPE Annual Congress in Tokyo, Quality Magazine White Paper, 2006.
- [17] PÁCZELT I., MRÓZ Z., On optimal contact shapes generated by wear, International Journal for Numerical Methods in Engineering, 63, 9, 2005, 1250-1287.

-
- [18] MRÓZ Z., On the stability of friction contact, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics* 38, 2000, 315-329
- [19] BIAŁAS M., MRÓZ Z., *Modelowanie zniszczenia warstwy kontaktowej pod wpływem obciążeń monotonicznych*, Sympozjum Mechaniki Zniszczenia Materiałów i Konstrukcji (23-26.05.2001;Augustów;Polska), Zeszyty Naukowe Politechniki Białostockiej, 24, 2001, 41-48.
- [20] BIAŁAS M., MRÓZ Z., Crack patterns in thin layers under temperature loading. *Part I: Monotonic loading*. Eng. Fract. Mech.73, 2006, 917–938; *Part II: Cycling loading*, Eng. Fracture Mechanics, 73, 2006, 939-952.

THE USE OF BEARING SURFACE RATIO TO OBTAIN THE CHARACTERISTICS OF CONTACT BETWEEN PART AND LOCATOR

This paper presents modelling of contact between a part and a locator in the alignment process. Contact model is described for two dry surfaces – one is rough and susceptible to deformations, while the other one is theoretically flat and rigid. Geometrical contact model has been built based on surface bearing ratio acquired through direct measurements. The correctness of presented approach to FEM modelling is proven by good conformity of results with the experiment carried out by Z. Makodoński, for the contact of two grinded surfaces of C45 steel. Additionally, proposed method of contact modelling is used to determine the influence of bearing ratio on contact characteristics for EN AW-5754 aluminium alloy machined by milling and grinding.