

Jan MUSIALIK

Politechnika Częstochowska

REZYSTANCJA STREFY KONTAKTU W NAGNIATANIU ELEKTROMECHANICZNYM

Słowa kluczowe

Warstwa wierzchnia, obróbka powierzchniowa, nagniatanie, rezystancja, nagniatanie elektromechaniczne.

Streszczenie

Istotną rolę w procesie tworzenia specyficznej struktury warstwy wierzchniej w obróbce nagniataniem elektromechanicznym odgrywa rezystancja strefy kontaktu.

W pracy zaprezentowano model strefy kontaktu oraz schemat poglądowy, umożliwiający opis zjawisk zachodzących w tej strefie, podano również widok strefy rzeczywistego kontaktu narzędzia z przedmiotem.

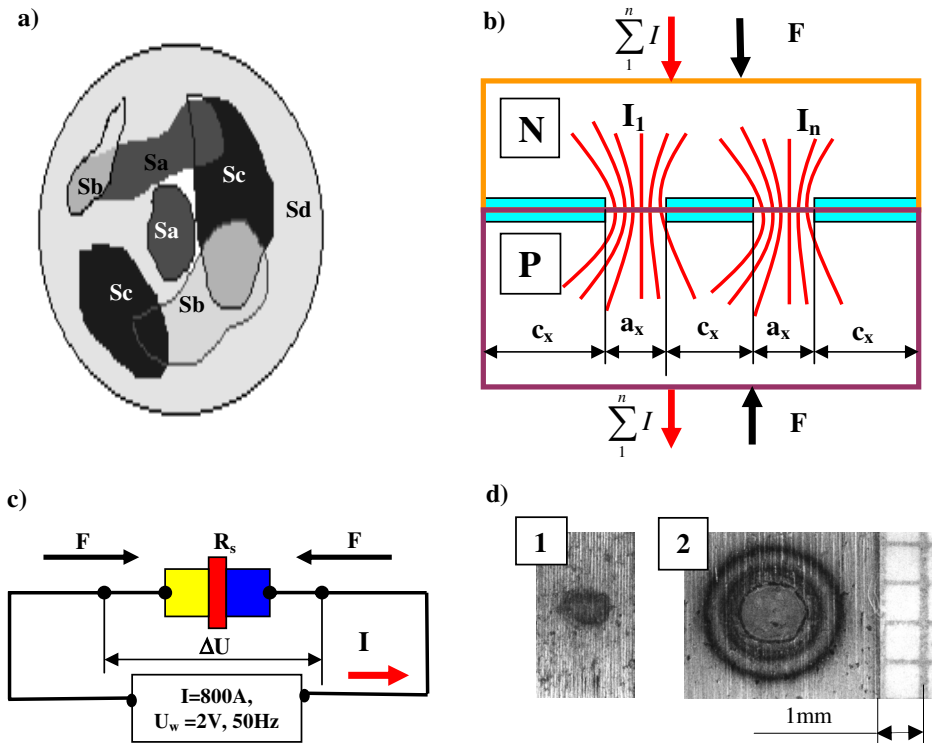
Przedstawiono poglądowy przebieg zmian rezystancji strefy kontaktu, naciski i temperaturę w zależności od pola strefy kontaktu. Podano krzywe teoretyczne zmian rezystancji pola kontaktu, które mają istotny wpływ na właściwości użytkowe warstwy wierzchniej nagniatanej elektromechanicznie.

1. Rezystancja strefy kontaktu

Istotną rolę w obróbce nagniataniem elektromechanicznym odgrywa rezystancja strefy kontaktu. Na rysunku 1 przedstawiono model strefy kontaktu oraz schemat poglądowy umożliwiający opis zjawisk zachodzących w tej strefie, jak również widok strefy rzeczywistego kontaktu narzędzia z przedmiotem.

Spośród różnych teorii kontaktu [2–6, 12–14] najbardziej przydatna do wyjaśnienia zjawisk zachodzących w procesie nagniataniem elektromechanicznego wydaje się być teoria Holma [1, 4].

Niecała powierzchnia rzeczywista materiału przewodzi prąd elektryczny (szczególnie w początkowej fazie kontaktu), a jedynie obszary Sa i Sb (rys. 1) o kontakcie metalicznym i quasi-metalicznym, gdzie w obszarze styku następuje zagęszczenie linii prądu (rys. 1b, wzrost rezystancji) i nagły wzrost temperatury powodujący przemiany fazowe i obniżenie granicy plastyczności materiałów biorących udział w kontakcie. Quasi-metaliczny kontakt realizowany jest poprzez płaszczyzny molekularne dzięki efektowi tunelowemu. Niektóre płaszczyzny przy dużym gradiencie pola elektrycznego łączą się ze sobą mostkami meta-



Rys. 1. Model strefy kontaktu, schemat poglądowy do opisu zjawisk zachodzących w tej strefie oraz widok strefy kontaktu narzędzia z przedmiotem: a) model strefy kontaktu, b) zagęszczone linie przepływu prądu przez pola przewodzące, c) schemat poglądowy rezystancji strefy kontaktu, d) widok strefy rzeczywistego kontaktu, I_1 do I_n – prądy płynące przez pola przewodzące, I – prąd płynący przez obszar kontaktu, ΔU – spadek napięcia na rezystancji (R_s) strefy kontaktu, Sa, a_x – strefa kontaktu metalicznego, Sb – strefa kontaktu quasi-metalicznego, Sc, c_x – strefa nie przewodząca, 1 – etap początkowy kontaktu ($t_1 = 0,3 \text{ s}$), 2 – etap końcowy kontaktu ($t_2 = 2,0 \text{ s}$), stal 40H, $I = 800 \text{ A}$, $F = 150 \text{ N}$, $\Delta U \approx 0,3 \text{ V}$

licznymi. Na powierzchni styku występują pola pokryte tlenkami, solami i innymi związkami nieprzewodzącymi prądu elektrycznego (pola S_c). Jest również część powierzchni (S_d), która na pewnym etapie nie bierze udziału w przewodzeniu prądu.

Na powierzchni obrabianej występuje warstewka tlenków i zanieczyszczeń wprowadzających dodatkową rezystancję R_t . W tym ujęciu rezystancja strefy kontaktu R_{sk} ostatecznie wynosi:

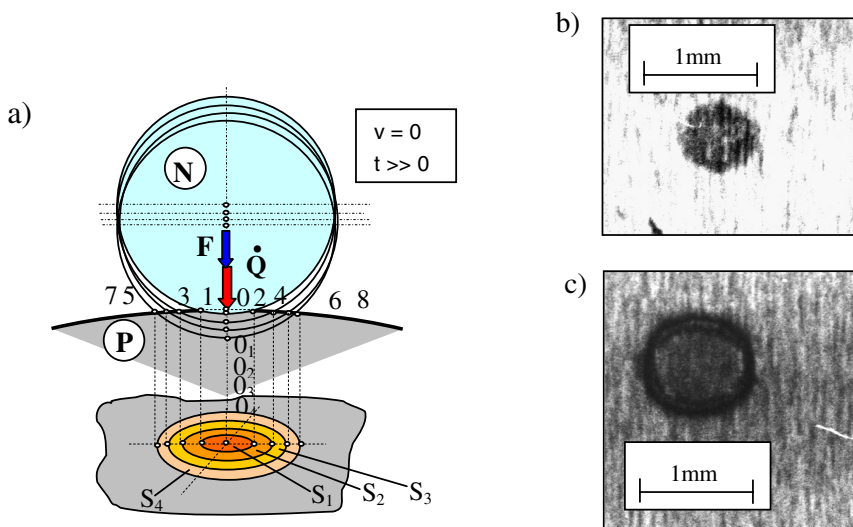
$$R_{sk} = R_k + R_t \quad (1)$$

w tym: R_k – rezystancja pola kontaktu, R_t – rezystancja powłoki tlenkowej.

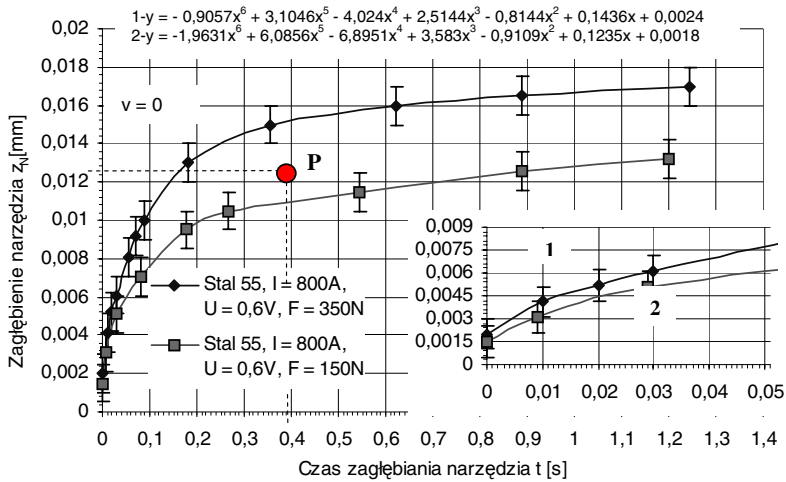
Przy dużych obciążeniach kontaktowych, z jakimi mamy do czynienia w czasie podgrzewania stref kontaktu do wysokich temperatur i odkształceń plastycznych, zachodzi deformacja punktów kontaktowych, a pole kontaktu dąży do pola powierzchni teoretycznej. W tym przypadku, zakładając uproszczenie, przyjęto

$$R_{sk} \approx R_k \quad (2)$$

W procesie nagniatania elektromechanicznego mamy do czynienia ze zmienną rezystancją pola kontaktu. Na zmianę oporu strefy kontaktu R_{sk} największy wpływ ma zmiana pola i temperatury strefy kontaktu (rys. 2 i 3).



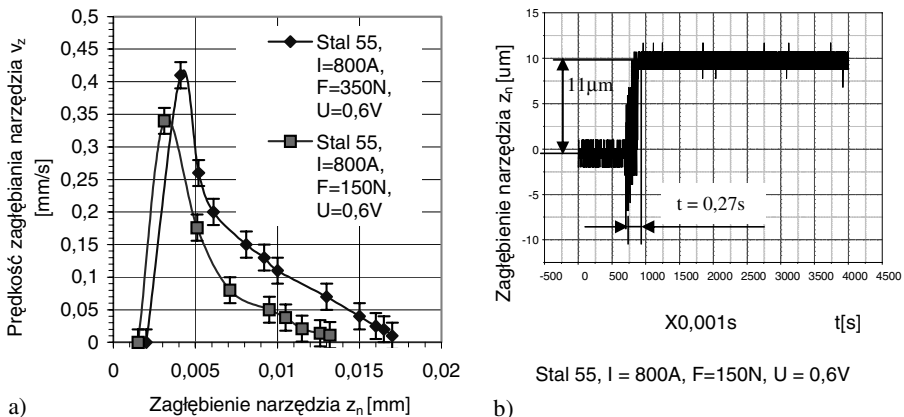
Rys. 2. Etapy zagłębienia narzędzia w warstwę wierzchnią: a) schemat zagłębienia, 0_1 do 0_4 – środki kolejnych stref kontaktu, 1 do 8 – punkty graniczne strefy kontaktu, S_1 do S_4 – pole kontaktu w danej chwili, b) widok strefy odkształconej dla $t = 0,33$ s, c) widok strefy odkształconej dla $t = 1,15$ s, stal 40H, $I = 500$ A, $U = 0,42$ V, $F = 150$ N, $R_{zk} = 8,5$ mm



Rys. 3. Przebieg zmian zagłębienia narzędzia w zależności od czasu oddziaływania narzędzia

Rysunek 2 obrazuje etapy zagłębienia narzędzia w warstwę wierzchnią. Duża prędkość zagłębienia narzędzia w początkowym okresie nagniatania powoduje duży wzrost obszaru kontaktu, który jest przyczyną zmniejszania się gęstości strumienia ciepła, a to w efekcie wywołuje spadek temperatury tej strefy do chwili wyrównania się nacisków narzędzia z granicą plastyczności materiału obrabianego w tej temperaturze (rys. 3).

Na rysunku 4a przedstawiono przykładowe przebiegi zmian pola kontaktu w zależności od czasu oddziaływania narzędzia na materiał obrabiany dla $t > 0$ ($v = 0$). Przebieg zagłębienia narzędzia rejestrowano komputerowym układem rejestracji z modułem kontrolno-pomiarowym LC-011-1612, czujnikiem MDKa-C3 i zespołem pomiarowym VISTRONIC C (rys. 4b).



Rys. 4. Zmiany prędkości zagłębienia narzędzia w nagniataną warstwę wierzchnią: a) zmiany prędkości zagłębienia, b) przykładowy przebieg zagłębienia narzędzia dla punktu P (rys. 3)

W tym przypadku do oceny rezystancji należy wziąć pod uwagę rezystancję statyczną i dynamiczną. Rezystancja statyczna określana jest stosunkiem napięcia do natężenia prądu w danym punkcie [11]:

$$R_s = \frac{U}{I} \quad (3)$$

Rezystancja dynamiczna jest pochodną napięcia względem natężenia prądu w danej strefie kontaktu:

$$R_d = \frac{dU}{dI} \quad (4)$$

W przybliżeniu wyznacza się rezystancję dynamiczną jako stosunek przyrostu napięcia do przyrostu natężenia prądu:

$$R_d \approx \frac{\Delta U}{\Delta I} \quad (5)$$

Rezystancję kontaktową R_k elementu nagniatającego z nierównościami powierzchni określa prawo Ohma:

$$\frac{1}{R_k} = \sum_{i=0}^{i=n} \frac{1}{R_i} \quad (6)$$

gdzie: R_i jest rezystancją kontaktową narzędzia z i -tą nierównością.

Doświadczalnie określono [7], że

$$R_k = \frac{\rho_{pT} + \rho_{nT}}{2\sqrt{S_{\Sigma i}}} \quad (7)$$

gdzie: ρ_{pT} – rezystywność przedmiotu nagniatanego, ρ_{nT} – rezystywność narzędzia nagniatającego (w $\mu\Omega \cdot m$), $S_{\Sigma i}$ – pole powierzchni styku narzędzia z i -tymi nierównościami powierzchni.

Przyjmując do rozważań uproszczenie, że cała powierzchnia kontaktu S przewodzi prąd, można przyjąć

$$R_k = \frac{\rho_{pT} + \rho_{nT}}{2\sqrt{S}} \quad (8)$$

Rezystancja powierzchni styku narzędzia z przedmiotem obrabianym zależy od rezystywności w danej temperaturze materiałów biorących udział w procesie nagniatania elektromechanicznego i pola strefy kontaktu.

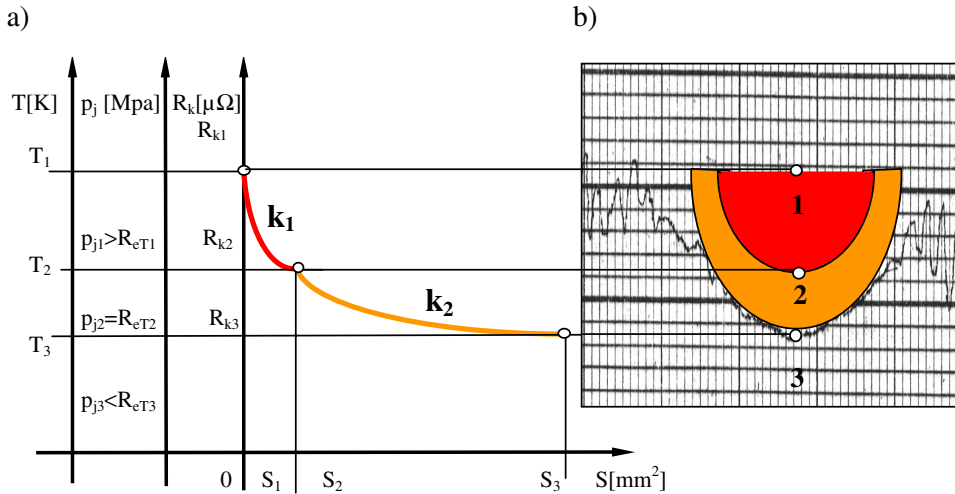
Na rysunku 5 przedstawiono poglądowy przebieg zmian rezystancji strefy kontaktu, naciski i temperatury w zależności od pola strefy kontaktu. Fragmenty teoretycznych krzywych zmian rezystancji pola kontaktu, przedstawione na

rysunku 5a, mają przebieg o charakterze zgodnym z zależnością (12). Wstawiając do zależności (8):

$$C_1 = \frac{\rho_{pT} + \rho_{nT}}{2} [\mu\Omega \cdot m] \quad (9)$$

otrzymujemy

$$R_k = \frac{C_1}{\sqrt{S}} [\mu\Omega] \quad (10)$$



Rys. 5. Zmiany rezystancji strefy kontaktu, nacisku i temperatury w zależności od pola strefy kontaktu: a) krzywe zmian rezystancji, R_{k1} – rezystancja początkowa strefy kontaktu, R_{k2} – rezystancja strefy kontaktu na granicy przejścia nierówności powierzchni w materiał rodzimy, R_{k3} – rezystancja strefy kontaktu na końcu zagłębienia narzędzia w materiał, S_1 – pole strefy kontaktu na początku styku, S_2 – pole strefy kontaktu na granicy przejścia nierówności powierzchni w materiał rodzimy, S_3 – pole strefy kontaktu na końcu zagłębienia narzędzia w materiał, p_{j1} – nacisk jednostkowy, większy od granicy plastyczności materiału w temperaturze T_1 ($p_{j1} > R_{eT1}$), p_{j2} – nacisk jednostkowy, równy granicy plastyczności materiału w temperaturze T_2 ($p_{j2} = R_{eT2}$), p_{j3} – nacisk jednostkowy, mniejszy od granicy plastyczności materiału w temperaturze T_3 ($p_{j3} < R_{eT3}$), T_1 – temperatura początkowa strefy kontaktu, T_2 – temperatura na granicy przejścia nierówności powierzchni w materiał rodzimy, T_3 – temperatura na końcu zagłębienia narzędzia w materiał, k_1 – krzywa zmian rezystancji w zależności od pola kontaktu narzędzia z przedmiotem w strefie nierówności powierzchni, k_2 – krzywa zmian rezystancji kontaktowej w zależności od pola kontaktu narzędzia z przedmiotem w strefie materiału rodzimego, b) profilogram strefy odcisku narzędzia w materiale, 1, 2 – etapy zagłębienia narzędzia

Dla praktycznych zastosowań obliczeń rezystancji kontaktu $R_k [\mu\Omega]$, w zależności od rezystywności narzędzia $\rho_{nT} [\mu\Omega \cdot m]$, rezystywności materiału na-

gniatanego ρ_{pT} [$\mu\Omega \cdot m$], granicy plastyczności materiału w danej temperaturze R_{eT} [Pa], siły naporu F [N] i pola kontaktu S [m^2] [8, 9, 15] można dokonać z zależności (11).

$$S = \frac{1,5F}{R_{eT}} [m^2] \quad (11)$$

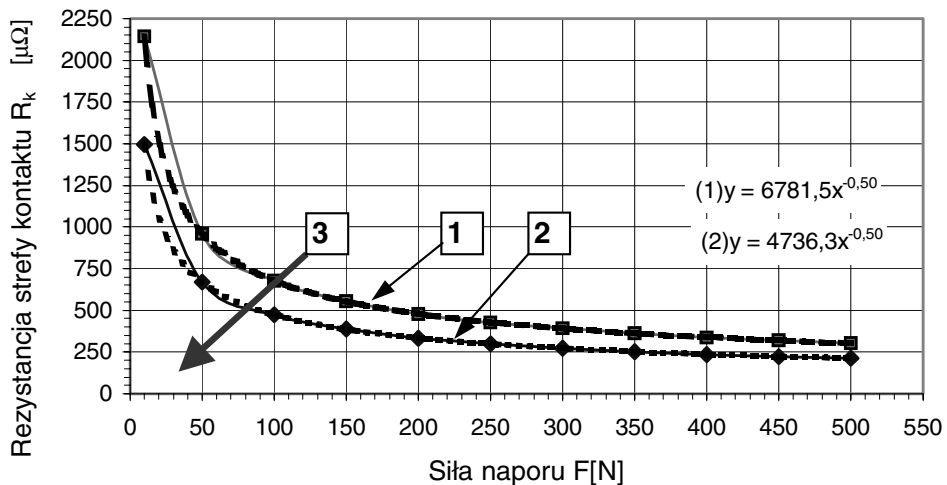
Wstawiając (11) do (10), mamy

$$R_k = C_1 \sqrt{\frac{R_{eT}}{1,5F}} [\mu\Omega] \quad (12)$$

Na rysunku 6 przedstawiono przebieg zmian rezystancji strefy kontaktu w zależności od siły naporu F , przy założeniach: $T = T_o = 293$ K, $\rho_{pT} = 0,097 \mu\Omega \cdot m$ i $\rho_{nT} = 0,49 \mu\Omega \cdot m$. Dla $C_1 \approx 0,293 \mu\Omega \cdot m$ i dla stali 55 – $R_{eT} \approx 400$ MPa, dla stali 40H – $R_{eT} \approx 800$ MPa, otrzymano zależność:

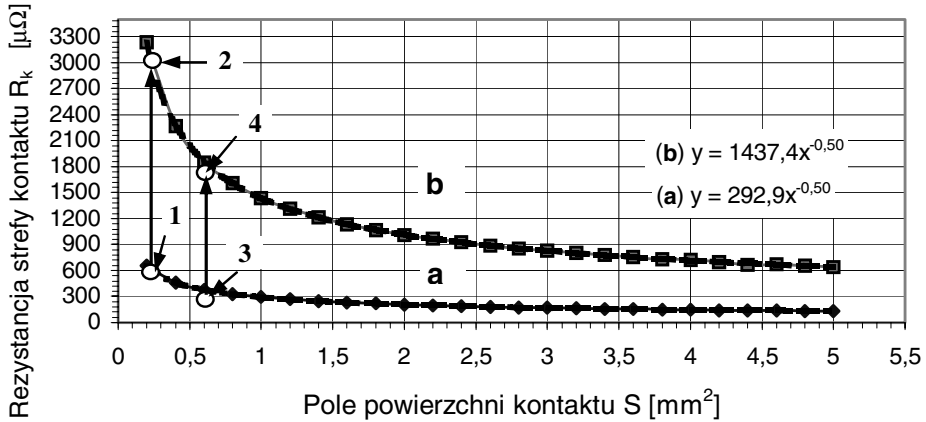
$$\text{dla stali 55: } R_k = \frac{4793}{\sqrt{F}} [\mu\Omega],$$

$$\text{dla stali 40 H: } R_k = \frac{6778}{\sqrt{F}} [\mu\Omega]$$



Rys. 6. Przebieg zmian rezystancji R_k strefy kontaktu w zależności od siły naporu F : 1 – stal 55, 2 – stal 40H, 3 – tendencja przebiegu zmian rezystancji wraz ze zmniejszaniem się granicy plastyczności stali

Na rysunku 7 przedstawiono przebieg zmian rezystancji strefy kontaktu R_k w zależności od pola kontaktu S i temperatury strefy kontaktu.



Rys. 7. Przebieg zmian rezystancji strefy kontaktu: a – w temperaturze $T_1 = 293$ K, b – w temperaturze $T_2 = 1123$ K, w zależności od pola strefy kontaktu S , 1, 2 – zmiana rezystancji w wyniku zmiany temperatury w czasie załączenia prądu – przy polu początkowym strefy kontaktu $S_{rx} = 0,2$ mm², 3, 4 – zmiana rezystancji w wyniku zmiany temperatury w czasie włączania prądu (pole początkowe strefy kontaktu $S_{rx} = 0,6$ mm²)

Dokładne określenie wartości rezystancji strefy kontaktu jest trudne z tego względu, że wartość rezystancji zmienia się ze zmianą temperatury według zależności:

$$R_{k(T)} = R_{293\text{ K}} [1 + \beta(T - 293\text{ K})] \quad (13)$$

gdzie: $R_{k(T)}$ – rezystancja strefy kontaktu w temperaturze T w K, $R_{293\text{ K}}$ – rezystancja strefy kontaktu w temperaturze 293 K w $\mu\Omega$, β – temperaturowy współczynnik rezystancji w 1/K. Temperaturowy współczynnik rezystancji dla stali wynosi $\beta = 0,0045 \div 0,0047$ 1/K [10]. I tak dla temperatury $T = 1123$ K i współczynnika $\beta = 0,0047$ 1/K będzie:

$$R_{k(1123\text{ K})} \approx 4,9 \cdot R_{293\text{ K}} \quad (14)$$

Z przedstawionych na wykresie (rys. 7) przebiegów zmian rezystancji R_k w zależności od pola strefy kontaktu wyraźnie wynika, że wzrost temperatury powoduje znaczny przyrost rezystancji strefy kontaktu, co ma istotne znaczenie, szczególnie przy małych wartościach sił naporu na nagniatany elektromechanicznie materiał.

Podsumowanie

Istotną rolę w procesie tworzenia specyficznej struktury warstwy wierzchniej w obróbce nagniataniem elektromechanicznym odgrywa rezystancja strefy kontaktu. Jedynie część rzeczywistej powierzchni materiału o kontakcie metalicznym i quasi-metalicznym przewodzi prąd elektryczny (szczególnie w początkowej fazie kontaktu). W miejscach tych następuje nagły wzrost temperatury, powodujący przemiany fazowe i obniżenie granicy plastyczności materiałów biorących udział w kontakcie.

W procesie nagniatania elektromechanicznego obserwuje się zmianę rezystancji pola kontaktu. Największy wpływ na zmianę oporu strefy kontaktu ma zmiana pola i temperatury strefy kontaktu. Wzrost temperatury powoduje znaczny przyrost rezystancji strefy kontaktu, co ma istotne znaczenie, szczególnie przy małych wartościach sił naporu na nagniatany elektromechanicznie materiał.

Bibliografia

1. Barwell F.T.: Łożyskowanie. WNT, Warszawa 1984.
2. Bednarski T.: Zarys mechaniki plastycznego płynięcia. Cz. II. Instytut Obróbki Plastycznej, Poznań 1991, 239–263.
3. Bowden F.P., Tabor D.: Wprowadzenie do trybologii. WNT, Warszawa 1980.
4. Holm R.: Elektrisches Kontakte. Maszgiz. Moskwa 1961.
5. Jezierski J., Mazur T.: Theoretical bases of calculations of plastic deformation layer at contact of two bodies. The 4th International Scientific Conference Development of Metal Cutting DMC 2002, Košice 2002, 115–121.
6. Jezierski J., Mazur T., Tubielewicz K.: Calculation and measurement the depth of plastic deformation for contact of two bodies. Machine Engineering. Open and global manufacturing design. Wrocław 2002, vol. 2, No 1–2, 183–192.
7. Kukiełka L.: Teoretyczne i doświadczalne podstawy powierzchniowego nagniatania tocznego z elektrokontaktowym nagrzewaniem. Wyższa Szkoła Inżynierska w Koszalinie, Monografie Wydziału Mechanicznego nr 47, Koszalin 1994.
8. Musialik J.: Description of (visco-plastic) material to be applied in treatment by electromechanical burnishing, The 4th International Scientific Conference Development of Metal Cutting DMC 2002, Košice 2002, 181–184.

9. Musialik J.: Zjawiska termomechaniczne determinujące właściwości warstwy wierzchniej stali nagniatanej elektromechanicznie. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej. Monografia nr 93. Częstochowa 2003.
10. Praca zbiorowa. Poradnik inżyniera mechanika. T. I, Rozdziały XI–XVI, WNT, Warszawa 1968.
11. Przedziecki F.: Elektrotechnika i elektronika. PWN, Warszawa 1978.
12. Przybylski W.: Technologia obróbki nagniataniem. WNT, Warszawa 1987.
13. Szczerek M., Tuszyński W.: Badania trybologiczne. Zakład Poligrafii Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom 2000.
14. Wachal A.: Analysis of boundary layer estimating criteria in lubricating oils investigation, Zagadnienia Eksploatacji Maszyn 1983, z. 3, 325–332.
15. Walczak J.: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. T. I i II. PWN, Warszawa–Kraków 1978.

Recenzent:

Tadeusz BURAKOWSKI

The resistance of the contact zone in electromechanical burnishing

Summary

The study describes and attempts to explain the thermomechanical phenomena occurring in the upper layer of steel subjected to electromechanical burnishing. In the process considered, mechanical and thermal actions resulting from plastic deformations occurring during the pressure of the burnishing elements as it moves over the heated surface are utilized at the same time. As a result of simultaneous pressure and heating of internal upper-layer zones, surface irregularities deform and the upper layer obtains specific service properties.

An important role in the process of formation of a specific upper layer structure during surface treatment by electromechanical burnishing is played by the resistance of the contact zone.

A model of the contact zone and a visual schema allowing the description of phenomena occurring in this zone are presented in the paper. The view of the zone of actual contact between the tool with the workpiece is also shown.

The variation of contact zone resistance, pressures and temperature, as dependent on the contact zone area are outlined. Theoretical curves representing variations in contact area resistance, which substantially affect the service properties of the upper layer as burnished electromechanically are provided.