

Dr inż. Edward WAJS (Politechnika Świętokrzyska):

ANALIZA STANU NAPRĘŻENIE–ODKSZTAŁCENIE W POWŁOKACH GALWANICZNYCH ZAWIERAJĄCYCH CZĄSTKI SiC

Streszczenie

Powłoki galwaniczne od lat znajdują zastosowanie w wielu obszarach przemysłu i nauki. Ze względu na umacnianie matryc tych powłok cząstkami twardej fazy znacząco podnosi się ich właściwości eksploatacyjne. Bardzo ważną rolę odgrywają pojawiające się w powłokach naprężenia, zarówno w procesie elektrolizy, jak i później – w czasie eksploatacji w różnych węzłach tarcia. Właśnie temu zagadnieniu został poświęcony niniejszy artykuł.

***Słowa kluczowe:** powłoki galwaniczne, cząstki SiC, naprężenie, Odkształcenie*

ANALYSIS OF THE STRESS-STRAIN CONDITION IN GALVANIZED COATINGS CONTAINING SiC PARTICLES

Abstract

For many years, galvanized coatings have been used in many areas of science and industry. Due to reinforcement of matrices of these coatings with hard phase particles, their performance properties are being significantly improved. A crucial role is played by stresses occurring in the coatings, both in the process of electrolysis and later – in use, in various friction nodes. This is the issue examined in the present study.

ANALIZA STANU NAPRĘŻENIE-ODKSZTAŁCENIE W POWŁOKACH GALWANICZNYCH ZAWIERAJĄCYCH CZĄSTKI SIC

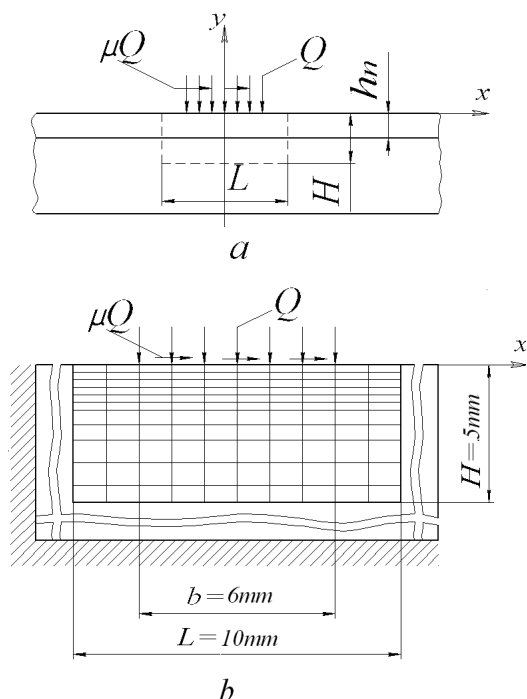
Edward WAJS¹

Powłoki galwaniczne znajdują od lat zastosowanie w wielu obszarach przemysłu i nauki. Ze względu na umacnianie ich matrycy cząstkami twardej fazy znacząco podnosi się ich właściwości eksploatacyjne. Bardzo ważną rolę odgrywają pojawiające się w nich naprężenia, zarówno w procesie elektrolizy, jak i później w czasie eksploatacji w różnych węzłach tarcia, w związku z czym temu zagadnieniu został poświęcony dany artykuł.

Aby zbadać wpływ fizyko-mechanicznych charakterystyk (grubości, modułu sprężystości oraz gradientu właściwości w głąb materiału) powłoki na wielkość i charakter rozkładu naprężeń podczas obciążenia w materiale (miejsce styku) oraz poszukiwaniu sposobów podniesienia trwałości zostały przeprowadzone teoretyczne badania stanu naprężeniowo-odkształceniowego na modelu (płytki z różnymi powłokami) za pomocą metod numerycznych.

Dany model przedstawiony jest w postaci płytki o nieskończonej długości i dużej grubości, na powierzchni której były naniesione powłoki z różnymi fizyko-mechanicznymi właściwościami. Zbadano stan naprężeniowo-odkształceniowy (SNO) w ograniczonym obszarze (rys. 1, *a*) o długości $L = 10$ mm i wysokości $H = 5$ mm. Badany obszar podzielony był na 120 elementów w formie prostokątów, przy czym podział odbywał się tak, że bardziej gęstą była siatka w warstwach wierzchnich, które modelowały (rys. 1, *b*).

¹ Politechnika Świętokrzyska, Al. 1000-lecia P.P.7, 25-514 Kielce



Rys. 1 Model obliczeniowy:

a – widok ogólny;

b – obszar badania stanu SNO

Obciążenie siłami tarcia modelowano równomiernie rozkładając normalne obciążenie $Q=200$ MPa i naprężenie styczne $F = \mu Q$, gdzie μ – bezwymiarowy współczynnik (współczynnik tarcia, $\mu < 1$). Siły te działają na odcinku $b = 6$ mm. Dany model ma wygląd płaskiej pieczęci, która ślizga się po powierzchni.

Zadanie było rozwiązywane w sprężystym obszarze, gdzie badano płaski stan naprężeniowo-odkształceniowy płytki. Obliczenia przeprowadzono przy stałym значeniu modułu sprężystości, jaki dla stali węglowej wynosi $E_o=2 \cdot 10^5$ MPa. Parametry powłoki i współczynnik μ zmieniały się w następujących granicach: grubość powłoki $h_n = 100 \dots 400$ μm ; moduł sprężystości powłoki $E_n = (1,9 \dots 2,9) \cdot 10^5$ MPa, $\mu = 0,1 \dots 0,9$. W celu przeprowadzenia obliczeń wybrano 12 wariantów różnych powłok (warianty 1-12), które różniły się gradientem właściwości mechanicznych w głąb powłoki (tabl. 1) oraz model płytki bez powłoki (wariant 0). Badając stan

naprężeniowo-odkształceniowy moduł sprężystości E_n był stały w głąb warstwy w zależności od ilości fazy wzmacniającej [1,3].

$$E = \frac{E_m \cdot E_f}{\xi \cdot E_f + (1 - \xi) \cdot E_m}, \quad (1)$$

gdzie $E_m = 1,86 \cdot 10^5$ MPa i $E_f = 3,94 \cdot 10^5$ MPa – moduły sprężystości, odpowiednio, osnowy i fazy wzmacniającej (SiC); ξ – udział objętościowy wzmacniającej fazy.

Tabela 1. Warianty modelu powłok dla badania stanu naprężenie-odkształcenie

№ warstwy	Grubość warstwy, μm	Wariant modelu „osnowa-powłoka”												
		0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		Znaczenia modułów sprężystości $E \cdot 10^5$ MPa												
1	100	2,0	1,9	1,9	1,9	1,9	2,4	2,4	2,4	2,4	2,9	2,9	2,9	2,9
2	100	2,0	2,0	1,9	2,058	2,9	2,0	2,4	2,058	2,9	2,0	2,9	2,058	2,9
3	100	2,0	2,0	1,9	2,4	2,4	2,0	2,4	2,4	2,4	2,0	2,9	2,4	2,4
4	100	2,0	2,0	2,0	2,9	2,05	2,0	2,0	2,9	2,05	2,0	2,0	2,9	2,05
5	100	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0
6	500	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0	2,0

W praktyce dane materiały są kompozytowymi elektrolitycznymi powłokami (KEP) z różną frakcją i ilością cząstek SiC oraz różną ilością warstw w powłoce. Warstwom z modułem $1,9 \cdot 10^5$ MPa, odpowiadają KEP z wtrąceniami wielkości $50 \mu\text{m}$ i zawartością 4% obj.; moduł $2,05 \cdot 10^5$ MPa cechuje powłoki z wtrąceniami rzędu $5 \mu\text{m}$ i udziałem około 10 %obj.; warstwa z cząstkami frakcji $28/20 \mu\text{m}$ z modułem rzędu $2,4 \cdot 10^5$ MPa przy udziale 25% obj. i warstwą o module $2,9 \cdot 10^5$ MPa – KEP z wtrąceniami wielkości $100 \mu\text{m}$ i udziałem 50% obj. W wariantach 1, 5, 9 modelowano jednowarstwowe powłoki o grubości $100 \mu\text{m}$. W wariantach 2, 6, 10 modelowano jednowarstwowe powłoki o grubości $300 \mu\text{m}$. W wariantach 3 i 4, 7 i 8, 11 i 12 modelowano wielowarstwowe powłoki z jednakowym modułem sprężystości na powierzchni i różnym gradientem jego zmian w głąb powłoki. W dalszej części będą oznaczone warstwy wg materiału i rozmiaru cząstek napełniacza (materiałem osnowy we wszystkich przypadkach jest nikiel), a kolejność analizowania warstw w gradientowej podwarstwie od powierzchni do osnowy, charakteryzująca się zwiększeniem rozmiaru cząstek i, odpowiednio mechanicznych właściwości jak „bezpośredni gradient” ($\text{Ni}+\text{SiC}(5) \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}(28) \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}(100) \rightarrow \text{osnowa}$) i odwrotnie - jeżeli warstwa wierzchnia cechuje się wysokimi właściwościami, a w miarę oddalenia od powierzchni znajdują się warstwy z niższymi mechanicznymi właściwościami – „odwrotny gradient” ($\text{Ni}+\text{SiC}(100) \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}(28) \rightarrow \text{Ni}+\text{SiC}(5) \rightarrow \text{osnowa}$), gdzie $\text{Ni}+\text{SiC}(5)$, $\text{Ni}+\text{SiC}(28)$, $\text{Ni}+\text{SiC}(100)$ – powłoki z wtrąceniami cząstek rzędu 5, 28 i $100 \mu\text{m}$, odpowiednio.

Metodyka obliczeniowa pozwala wyznaczyć normalne σ_x , σ_y i styczne τ_{xy} naprężenia w dowolnym punkcie danego obszaru [2].

Podczas badania stanu naprężeń główna uwaga poświęcona jest naprężeniom, których koncentracja może doprowadzić do zniszczenia powłoki, czyli również naprężeniom rozciągającym σ_x i maksymalnym stycznymi naprężeniami τ_{xy} . Naprężenia nor-

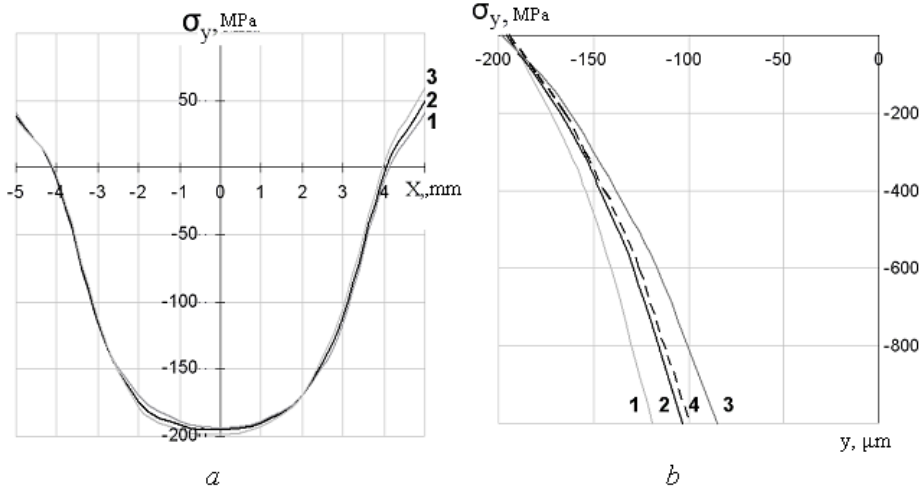
malne σ_y są mniej wrażliwe na zmiany warunków obciążenia (współczynnika tarcia) oraz budowy strukturalnej powłoki.

Jak pokazują obliczenia, naprężenia σ_y zależą od przyłożonej siły (obciążenia) i miejsca styku oraz praktycznie nie są zależne od mechanicznych właściwości powłoki i gradientu zmian właściwości odnośnie grubości (tab. 2, rys. 2, a, b).

Tabela2. Maksymalne wartości naprężeń σ_y wg grubości kompozytu „osnowa-powłoka”, MPa

Odległość od powierzchni, μm	Wariant modelu w systemie osnowa-powłoka								
	0	1	5	6	7	8			
	$h_n=0$	$h_n=100\mu\text{m}$	$h_n=100\mu\text{m}$	$h_n=300\mu\text{m}$	$H_p=400\mu\text{m}$	$h_n=400\mu\text{m}$			
	$\mu=0,5$					$\mu=0,1$	$\mu=0,5$	$\mu=0,9$	
0	-195	-194	-195	-195	-196	-194	-195	-198	
100	-180	-179	-180	-180	-181	-183	-180	-177	
200	-165	-165	-165	-165	-167	-172	-167	-162	
300	-155	-154	-155	-155	-157	-162	-156	-150	
400	-144	-144	-144	-144	-146	-154	-146	-138	
1000	-100	-100	-99	-100	-101	-119	-103	-84	

Na powierzchni powłoki w strefie kontaktu, σ_y zawsze będą naprężeniami ściskającymi, zaś ich maksimum będzie w centrum przyłożenia obciążenia, a poza strefą kontaktu – przechodzić będą w nieznaczne naprężenia rozciągające (rys. 1, a), przy czym podczas zwiększenia wartości współczynnika tarcia μ od 0,1 (krzywa 1) do 0,9 (krzywa 3) naprężenia maksymalne zarówno ściskające w centralnej części kontaktu, jak i rozciągające poza nią nieznacznie wzrosną, ale ich przyrost będzie niewielki. W głąb powłoki naprężenia σ_y będą się zmniejszały w miarę oddalenia od powierzchni (tab. 2, rys. 2, b), przy czym charakter zmian prawie nie będzie zależny od mechanicznych właściwości warstw. Nieznaczny wpływ ma współczynnik tarcia μ , podczas zwiększenia jego wartości od 0,1 do 0,9 naprężenia σ_y zmniejszą się w miarę oddalenia od powierzchni (rys. 2, odpowiednio krzywe 1,2,3), ale różnica ta dla grubości powłoki (do 400 μm) będzie nieznaczna – do 10%.



Rys. 2. Rozkład naprężeń σ_y w materiale (1 – wariant 8 modelu powłoki $\mu=0,1$; 2 – wariant 8 modelu powłoki $\mu=0,5$; 3 – wariant 8 modelu powłoki $\mu=0,9$): a – na powierzchni; b – wgłąb powłokiw centralnej strefie kontaktu (4 – wariant 0 modelu bez powłoki $\mu=0,5$).

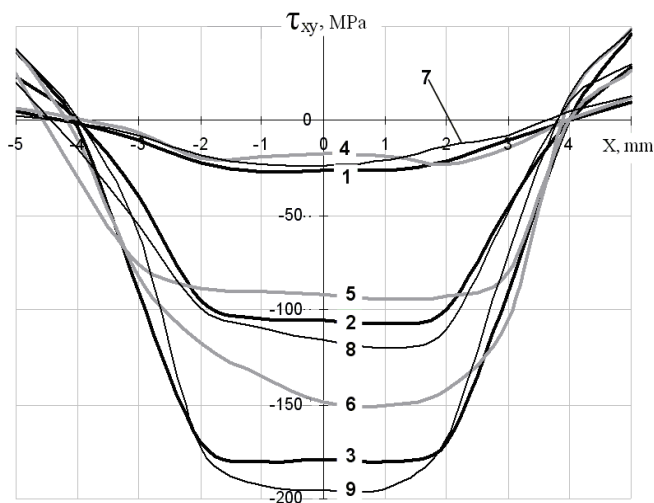
Tak więc, na wielkość naprężeń normalnych σ_y parametry strukturalne oraz warunki tarcia (współczynnik tarcia) wpływają nieznacznie i maksymalnymi naprężeniami będą naprężenia ściskające. Jednak naprężenia te nie wpłyną znacznie na odporność przeciwwuzyciową materiału. Dlatego też w dalszych badaniach stanu naprężeń będą analizowane naprężenia normalne σ_x i styczne τ_{xy} .

Jeżeli przytoczyć wyniki obliczeń z wyznaczania naprężeń na powierzchni powłoki, które pojawiają się przy różnych wartościach współczynnika tarcia, to w tym wypadku możliwe są różne warianty zmiany charakteru prowadzenia krzywych naprężeń w zależności od budowy strukturalnej materiału, a jednocześnie można je umownie ale i dokładnie podzielić na dwa typy:

– jako pierwszy można przytoczyć model bez powłoki (wariant 0); jednowarstwowe cienkie powłoki z własnościami zbliżonymi do własności osnowy (wariant 1 – warstwa z nanocząstkami); wielowarstwowe powłoki z warstwą wierzchnią, cechująca się właściwościami podobnymi do właściwości osnowy z naniesioną podwarstwą z prostym lub odwrotnym gradientem (warianty 3,4), lub kiedy warstwa cechuje się powyższymi właściwościami naniesionymi na bezpośredni gradient (warianty 7, 11). Danym wariantom odpowiadają krzywe naprężeń ukazane na rys. 3, 4.

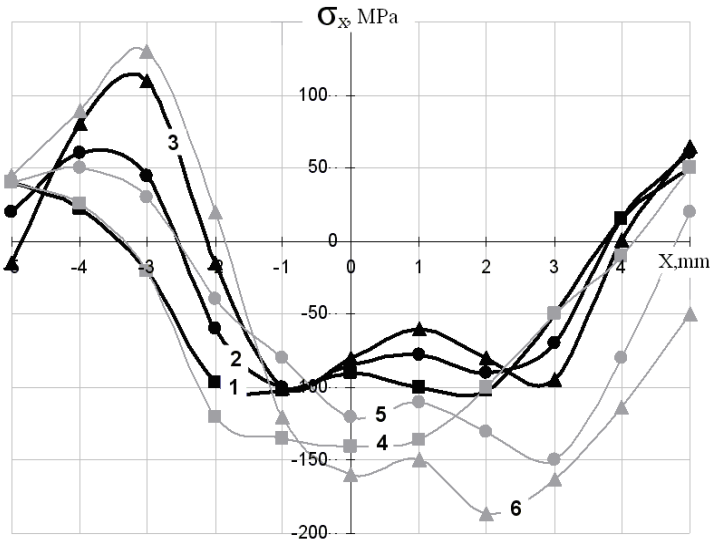
– do drugiego typu powłok odniosą się jednowarstwowe powłoki z wyższymi, niż w osnowie mechanicznymi własnościami (warianty 5, 9); powłoki o zwiększonej grubości (warianty 2, 6, 10); powłoki z wyższymi niż w osnowie właściwościami mechanicznymi naniesionymi na odwrotny gradient (warianty 8, 12). Dla tych wariantów wykreślono krzywe naprężeń pokazane na rysunku 5, 6.

Dla pierwszego przypadku strukturalnej budowy (warianty 0, 1, 3, 4, 7, 11) charakterystycznymi są ściskające naprężenia styczne, maksimum których znajduje się w centrum przyłożenia obciążenia lub obok niego. Poza strefą kontaktu naprężenia ściskające przechodzą w rozciągające o nieznacznych wartościach (rys. 3). Zwiększenie współczynnika tarcia μ od 0,1 (krzywe 1, 4, 7), $\mu=0,5$ (krzywe 2, 5, 8) do 0,9 (krzywe 3, 6, 9) prowadzi do znacznego wzrostu naprężeń w centralnej części strefy kontaktu oraz do nieznacznego zwiększenia naprężeń rozciągających poza tą strefą. Minimalnymi zaś naprężeniami stycznymi, przy różnych wartościach μ , charakteryzują się powłoki z wariantem 4, czyli kompozyty, w których warstwa z nanocząstkami naniesiona jest na odwrotny gradient.

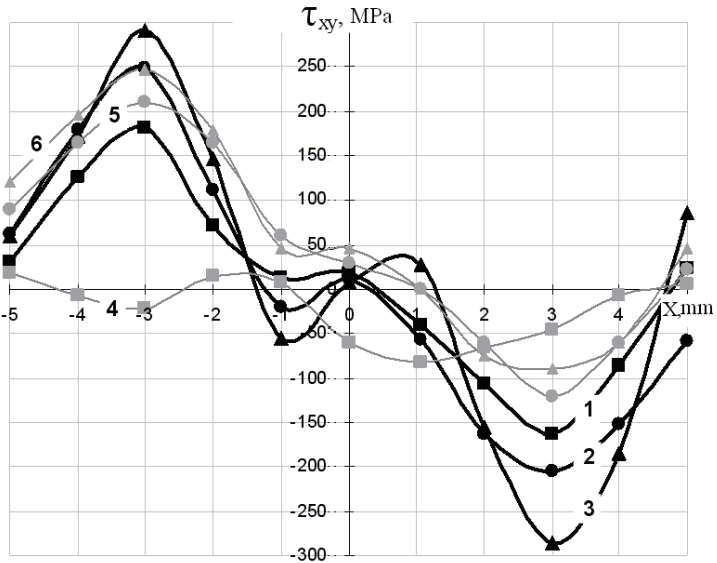


Rys. 3. Rozkład naprężeń stycznych τ_{xy} na powierzchni obszaru kontaktu: 1,2,3 – wariant 1 modelu powłoki z różnymi wartościami współczynnika tarcia $\mu=0,1; 0,5; 0,9$, odpowiednio; 4,5,6 – wariant 4 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$; 7,8,9 – wariant 7 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$

Dla nowych krzywych naprężeń σ_x , jak i dla naprężeń stycznych, można wydzielić strefę naprężeń ściskających (pod obciążeniem w strefie kontaktu) oraz naprężeń rozciągających (poza strefą kontaktu) (rys. 4). Przy niskim $\mu=0,1$ krzywe naprężeń są podobne do stycznych naprężeń, ponieważ są równomiernie rozłożone naprężenia ściskające pod strefą przyłożenia obciążenia, przechodzące w nieznaczne naprężenia rozciągające poza tą strefą (krzywe 1 i 4). Zwiększając μ do 0,5 (krzywe 2, 5) oraz do 0,9 (krzywe 3, 6) zauważa się rozkład naprężeń z jawnie wyrażonym maksimum (na granicy strefy kontaktu), wartość których znacznie jest zwiększona wraz ze zwiększeniem współczynnika tarcia. Poza strefą kontaktu zawsze rozmieszczają się znaczne naprężenia rozciągające, a przed nią – nieco mniejsze o wartości bezwzględnej naprężenia ściskające. Mniejszymi wartościami naprężeń σ_x charakteryzują się powłoki z właściwościami bliskimi do właściwości osnowy – warianty 1, niż powłoki z wariantem 7.



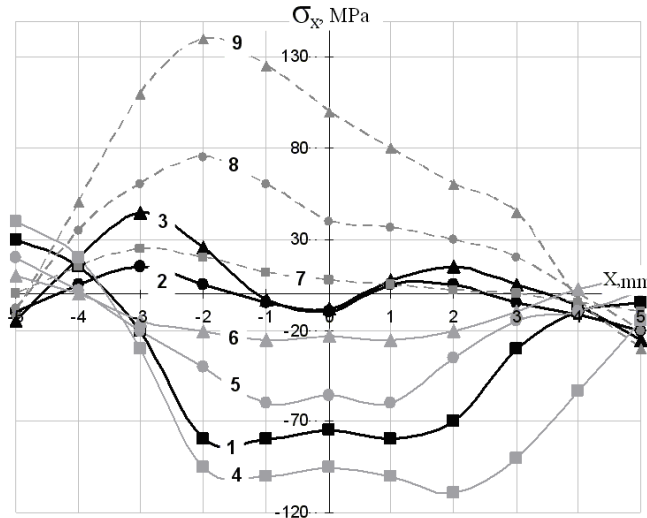
Rys. 4. Rozkład naprężeń σ_x na powierzchni obszaru kontaktu: 1,2,3 – wariant 1 modelu powłoki przy różnych znaczeniach współczynnika tarcia $\mu=0,1; 0,5; 0,9$, odpowiednio; 4,5,6 – wariant 7 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$



Rys. 5. Rozkład naprężeń stycznych τ_{xy} na powierzchni obszaru kontaktu: 1,2,3 – wariant 5 modelu powłoki z różnymi wartościami współczynnika tarcia $\mu=0,1; 0,5; 0,9$, odpowiednio; 4,5,6 – wariant 8 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$.

Inny wygląd mają zależności naprężeń na powierzchni kontaktu dla innego typu strukturalnej budowy (warianty 2, 5, 6, 8, 9, 10, 12). W tym przypadku dla naprężeń stycznych zauważa się wyraźne maksimum naprężeń, które znajdują się w punktach styku i usuniętego obciążenia, przy czym nawet z niskimi wartościami współczynnika tarcia $\mu=0,1$ (krzywe 1, 4 na rys. 5). Charakterystycznym jest σ_x powrotem w strefie kontaktu rozkładają się naprężenia rozciągające, a przed strefą – naprężenia ściskające, przy czym dla jednowarstwowych powłok (wariant 5) maksyma te są symetryczne odnośnie „0”, zarówno za tą wielkością, jak i za rozkładem wzdłuż powłoki oraz znacznie rosną ze zwiększeniem współczynnika tarcia μ do 0,5 (krzywe 2, 5) oraz do 0,9 (krzywe 3, 6).

Normalne naprężenia dla takiego typu powłok (rys. 6) mają mniejsze wartości i nie za duże skoki wartości i znaków naprężeń. Tak więc dla powłok jednowarstwowych (wariant 5, krzywe 1, 2, 3) oraz wielowarstwowych z warstwami o równej grubości (wariant 6, krzywe 4, 5, 6) krzywe są symetryczne względem środka strefy przyłożonego obciążenia i pokazują większe naprężenia ściskające. Jednowarstwowe powłoki ze zwiększoną grubością (wariant 8, krzywe 7, 8, 9) mają wyraźniejsze maksimum naprężeń rozciągających, które znajduje się w okolicy granicy strefy kontaktu. Dokładnie badana jest zależność naprężeń σ_x od zmian współczynnika tarcia μ . Zwiększając μ od 0,1 (krzywe 1, 4, 7) do 0,9 (krzywe 3, 6, 9) krzywe naprężeń na wykresie przemieszczają się wyżej i z naprężeń ściskających przechodzą w rozciągające.



Rys. 6. Rozkład naprężeń σ_x na powierzchni obszaru kontaktu (1,2,3 – wariant 5 modelu powłoki z różnymi wartościami współczynnika tarcia $\mu=0,1; 0,5; 0,9$, odpowiednio; 4,5,6 – wariant 8 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$; 7,8,9 – wariant 6 modelu powłoki przy $\mu=0,1; 0,5; 0,9$)

Podsumowując można powiedzieć, że zmniejszonymi wartościami naprężeń, zarówno stycznymi jak i normalnymi charakteryzują się powłoki z właściwościami zbliżonymi do właściwości osnowy (wariant 1 – warstwa z nanocząstkami) niż powłoki, właściwości których różnią się znacznie (wariant 5 – warstwa z cząstkami 28 μm). Zwiększenie współczynnika tarcia μ prowadzi do zwiększenia naprężeń, przy czym najczęściej powoduje to zwiększenie naprężeń rozciągających, które są bardziej niebezpieczne. Zwiększona grubość powłoki również doprowadza do większych wartości naprężeń rozciągających. Należy zaznaczyć, że naniesienie powłoki na gradientową podwarstwę, zarówno bezpośrednią, jak i odwrotną, prowadzi do znacznego zmniejszenia naprężeń, najlepsza opcja – kiedy naprężenia rozciągające przechodzą w naprężenia ściskające. Tak więc można wyznaczyć podobieństwo prowadzenia krzywych naprężeń stycznych dla pierwszego typu i normalnych dla drugiego (rys. 3 i 6), zaś krzywych naprężeń normalnych dla pierwszego typu i stycznych dla drugiego (rys. 4 i 5). Dla pierwszego typu naprężenia będą miały zawsze mniejsze bezwzględne wartości, gdzie szczególnie jest to ważne dla naprężeń rozciągających. Bardzo dobrym będzie opcja, kiedy w powłoce pojawią się naprężenia ściskające, przez to że przy nanoszeniu powłok metodą galwaniczną pojawiają się w niej resztkowe naprężenia rozciągające, a przy nakładaniu się z naprężeniami rozciągającymi, jakie mają miejsce przy działaniu sił tarcia pod obciążeniem znacznie wzrasta możliwość zniszczenia powłoki i na odwrót, przy pojawieniu się naprężeń ściskających możliwe jest zmniejszenie własnych naprężeń oraz naprężeń wynikających z procesów tarcia.

Przy optymalnym wskaźniku fizyko-mechanicznych charakterystyk osnowy i powłoki wynika możliwość podwyższenia nośności i trwałości elementów konstrukcyjnych przy obciążeniu kontaktowym. Drogą do tego jest: naniesienie odpornych na zużycie powłok z wysokim modułem sprężystości; wytworzenie powłok, w jakich podczas tarcia zmniejszają się naprężenia rozciągające oraz pojawiają się naprężenia ściskające w celu zredukowania naprężeń rozciągających w powłoce; utworzenie gradientowych powłok z „prostym” gradientem budowy, ponieważ warstwy z niskimi sprężystymi właściwościami powinny znajdować się blisko powierzchni, a bardziej trwałe warstwy w kierunku od powierzchni do osnowy, co sprzyja znacznemu zmniejszeniu naprężeń rozciągających.

LITERATURA

- [1] NECHAJEV Y., *On some techniques and experimental results: relevance for nanotechnology applications*, Karbon Nanostructures, 2007, 55, p. 189-202.
- [2] KUZAKOW E., *Grafowaja model uprugowo tela. Raschet naprazeno-deformacjonnowo sostojania*, Kiev, 1985, s. 53.
- [3] WAJS E., *Wear resistance composite electrolytic coating on base nikels*, Międzynarodowa konferencja E-MRS'2009 FALL MEETING pp. 220, 2009