

Jacek Domińczuk<sup>1)</sup>

## WPŁYW STANU ENERGETYCZNEGO WARSTWY WIERZCHNIEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZENIA ADHEZYJNEGO

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono charakterystykę energetyczną warstwy wierzchniej. Dokonano wyodrębnienia parametrów, które w sposób istotny wpływają na wartość swobodnej energii powierzchniowej. Artykuł zawiera również wyniki badań wpływu właściwości energetycznych warstwy wierzchniej na wytrzymałość połączenia. Prezentowane wyniki badań posłużyły dokonaniu analizy porównawczej stopnia rozwinięcia geometrycznego powierzchni z odpowiednio pracą adhezji i wartością składowej dyspersyjnej energii swobodnej.

**Słowa kluczowe:** energia powierzchniowa, połączenia klejowe, wytrzymałość, czynniki technologiczne.

### WPROWADZENIE

W obecnym czasie w rozwiązaniach technologicznych coraz częściej można dostrzec tendencję do nanoszenia na powierzchnie różnorodnych związków mających na celu polepszenie właściwości mechanicznych lub antykorozyjnych jak również prowadzenia na powierzchniach operacji technologicznych zmieniających stan warstwy wierzchniej [1]. Ma to duże znaczenie z uwagi na znaczną poprawę cech użytkowych produktów. Ze zjawiskami zachodzącymi w warstwie wierzchniej mocno związana jest operacja klejenia. Stąd dla właściwego konstytuowania parametrów jakościowych połączenia niezbędne jest poznanie parametrów decydujących o wytrzymałości połączenia co przyczyni się do szerszego wykorzystania technologii klejenia w aplikacjach przemysłowych [2].

Z prowadzonych doświadczeń wynika, że stan połączenia adhezyjnego zależy od właściwości energetycznych warstwy wierzchniej na której prowadzony jest określony proces technologiczny. Dotychczasowy stan wiedzy o zależnościach pomiędzy energią warstwy wierzchniej a stanem samej warstwy jest niekompletny [3, 4]. O wytrzymałości adhezyjnej połączenia decyduje szereg czynników, m.in.: postać geometryczna powierzchni, jej skład chemiczny, morfologia wytworzonych warstwek konwersyjnych, powierzchniowe defekty strukturalne, a ogólnie stan energetyczny powierzchni, oraz właściwości samej substancji nakładanej (np. kleju).

---

<sup>1)</sup> Instytut Technologicznych Systemów Informatycznych, Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska,  
e-mail: j.dominiczuk@pollub.pl

Ponieważ stan powierzchni podłoża elementów pokrywanych łatwo ulega różnorodnym zakłóceniom, granica styku podłoża ze spoiną np. klejową stanowi najczulsze miejsce złącza. Wszystko to sprawia, że zjawiska adhezji są bardzo złożone [5].

## WŁAŚCIWOŚCI ENERGETYCZNE WARSTWY WIERZCHNIEJ

Każde ciało ma pewien zasób energii. Jeżeli pominiemy energię, którą ciało ma w wyniku swego ruchu (kinetyczną) oraz położenia (potencjalną), a więc energię niezwiązaną ze strukturą ciała, to rozpatrując energię ciała związaną z jej strukturą można wyróżnić energię wewnętrzną i energię powierzchniową.

Energia wewnętrzna jest to całkowity zasób energii zmagazynowany we wnętrzu ciała. Należy wliczyć tu energię ruchów postępowych i rotacyjnych cząsteczek, wewnątrz cząsteczkowych drgań atomów, energię stanów elektronowych i jąder atomowych oraz wszystkie inne rodzaje energii występujące wewnątrz ciała. Dotychczas nie jest znana żadna metoda umożliwiająca stwierdzenie absolutnej wartości energii wewnętrznej, znane są tylko jej zmiany, na podstawie których oblicza się zmiany różnych funkcji termodynamicznych.

Na podstawie przytoczonych twierdzeń można zapisać wzór opisujący całkowitą energię ciała:

$$E = c_m \cdot m + e_p \cdot A \quad (1)$$

Dzieląc równanie (1) przez masę ciała, otrzymuje się wyrażenie na energię wewnętrzną, przypadającą na jednostkę masy [6]:

$$\frac{E}{m} = e_m + e_p \cdot \frac{A}{m} \quad (2)$$

W równaniu tym, iloraz  $\frac{A}{m}$  oznacza powierzchnię przypadającą na jednostkę masy ciała i zwany jest powierzchnią właściwą. W przypadku ciał o mało rozwiniętej powierzchni, wyrażenie  $\frac{A}{m}$  przybiera bardzo małe wartości i w związku z tym drugi człon równania (2) może być pominięty.

Stan energetyczny powierzchni jest bardzo złożony i zależy od wielu czynników. Niektóre z nich są wzajemnie zależne co jeszcze bardziej komplikuje proces prognozowania wyników operacji aktywujących powierzchnię. Specyfika wielu procesów technologicznych wymaga osiągnięcia określonego stanu energetycznego powierzchni i tak np. w procesie malowania dążymy do osiągnięcia maksymalnej energii powierzchniowej co zwiększa aktywność adhezyjną powierzchni i przyczynia się do powstania powłoki o większej żywotności. Natomiast w procesie przygotowania powierzchni współpracującej łożysk ślizgowych mamy na względzie takie ukonstytuowanie stanu warstwy wierzchniej by nie następowała na niej korozja adhezyjną (mała wartość energii powierzchniowej), a zarazem by był zachowany warunek dobrego smarowania. Aby sprostać tego typu wymaganiom konieczna jest

znajomość czynników mających wpływ na zjawiska powierzchniowe, oraz ich miar. Taka wiedza pozwoliła by właściwie opracowywać procesy technologiczne w zależności od postawionego celu.

W skali makrocelkości stan powierzchni, jej charakter, profil, naprężenia w warstwie wierzchniej, a więc energia powierzchniowa i reaktywność zależą od następujących czynników:

- przeszłości technologicznej powierzchni (obróbka wiórowa – skrawanie, toczenie itp., obróbka termiczna – hartowanie, odpuszczanie, wyżarzanie itp., obróbka ścierna – szlifowanie, dogładzanie, honowanie, polerowanie itp., obróbka chemiczna, obróbka cieplno-chemiczna – azotowanie, nawęglanie itp., obróbka elektrolityczna – chromowanie, niklowanie itp., obróbka elektroerozyjna),
- czynników eksploatacyjnych,
- czynników atmosferycznych.

Wymienione powyżej czynniki wpływają na stan powierzchni. Z charakterem powierzchni, jej profilem, defektami i naprężeniami wiąże się energia powierzchni, a z nią reaktywność i w związku z tym między innymi zdolność do adsorpcji lub chemisorpcji.

Na podstawie badań prezentowanych w pracy [6], oraz opierając się na wnioskach wynikających z charakterystyki energii powierzchniowej można ogólnie energię powierzchniową zapisać jako funkcję:

$$\sigma = \frac{M_g \cdot h_{\max}}{I_z} = \frac{160 \cdot 10^3 \text{ Nmm} \cdot 40 \text{ mm}}{7,84 \cdot 10^6 \text{ mm}^4} = 8,154 \text{ MPa} \quad (3)$$

gdzie:

n – rodzaj napelnacza,

$R_z$  – stereometria powierzchni,

h – czynniki chemiczne,

T – temperatura,

z – udział zanieczyszczeń w warstwie wierzchniej,

$\sigma_w$  – naprężenia własne,

H – twardość,

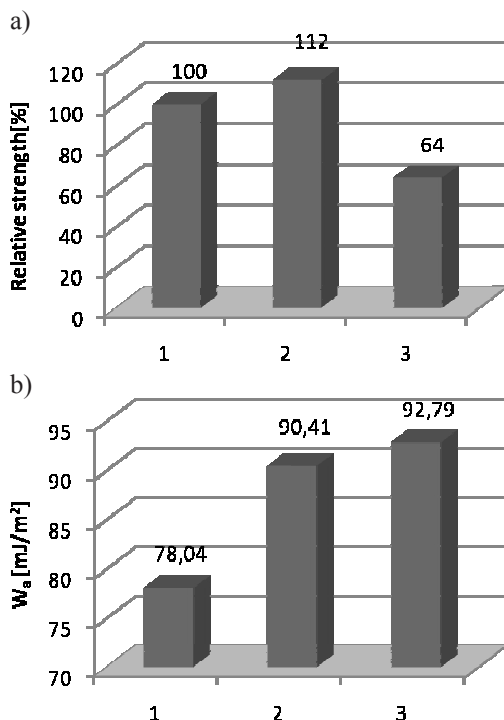
$r_m$  – rodzaj materiału,

d – defekty strukturalne.

## BADANIA WPŁYWU WŁAŚCIWOŚCI ENERGETYCZNYCH WARSTWY WIERZCHNIEJ NA WYTRZYMAŁOŚĆ POŁĄCZENIA

Analiza pracy adhezji po różnych sposobach przygotowania warstwy wierzchniej materiałów, wskazuje na potrzebę poszukiwania korelacji pomiędzy właściwościami energetycznymi i wytrzymałością połączenia klejowego [3, 6, 7, 8, 9].

Wyniki badań porównawczych dla stali węglowej 1.0426 przedstawiono na rysunku 1.



**Rys. 1.** Porównanie wytrzymałości połączeń klejowych (a) dla stali 1.0426 z pracą adhezji; (b): 1 – po obróbce narzędziem ściernym P320, 2 – po obróbce narzędziem ściernym P320 i odtłuszczeniu preparatem Loctite 7061, 3 – po obróbce narzędziem ściernym P320 i płukaniu wodą wodociągową [10]

**Fig. 1.** The comparison of an adhesive joint strength a) for steel 1.0426 with adhesion work; b) 1 – after the P320 abrasive tool processing, 2 – after the P320 abrasive tool processing and degreasing with the Loctite 7061, 3 – after the P320 abrasive tool processing and water rinsing [10]

Dla badanej stali zaobserwowany wzrost pracy adhezji po obróbce narzędziem ściernym P320 i płukaniu wodą nie znajduje odzwierciedlenia w wytrzymałości połączenia, która ulega obniżeniu. Nie wykryto również związku pomiędzy wartością pracy adhezji dla badanej stali po obróbce narzędziami ściernymi o różnej ziarnistości, a wytrzymałością względną odniesioną do obróbki narzędziem ściernym P320.

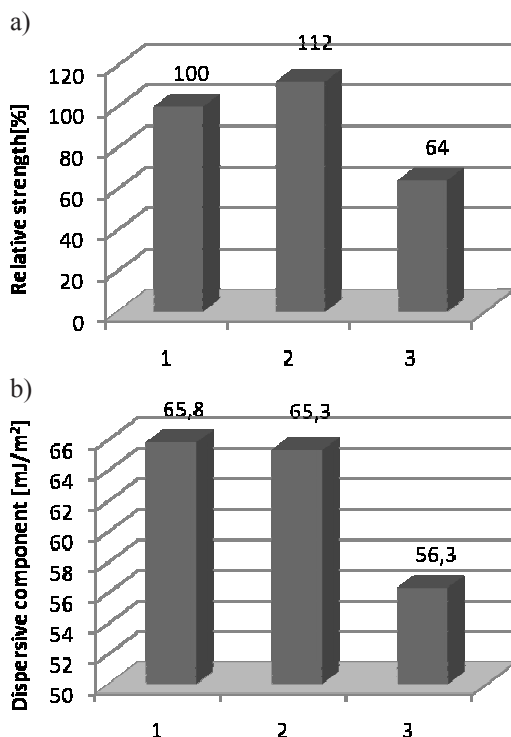
Porównując wytrzymałość połączenia z wartością swobodnej energii powierzchniowej wyznaczoną metodą Owens-Wendta uzyskano interesujące wyniki. Jak wiadomo, na wartość całkowitej energii swobodnej (nazywanej też powierzchniową) składa się część dyspersyjna i polarna. Jest to podział umowny, gdyż teoria adhezji jest ciągle rozbudowywana. W badaniach tych zastosowano drugą ciecz pomiarową istotnie różniącą się od wody pod względem cech energetycznych – diiodometan

CH<sub>2</sub>J<sub>2</sub>. Dokonując pomiaru kąta zwilżania dla dwóch cieczy można po odpowiednich przekształceniach znanych z termodynamiki zwilżania wyznaczyć zależność służącą do wyznaczenia swobodnej energii powierzchniowej. Wyniki obliczeń po dokonaniu pomiarów przedstawiono w tabeli 1.

**Tabela 1.** Wartości składowych swobodnej energii powierzchniowej stali 1.0426

**Table 1.** The component values of free surface energy for 1.0426 steel

Stan powierzchni	Energia swobodna [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część właściwa niepolarna [mJ/m <sup>2</sup> ]	Część właściwa polarna [mJ/m <sup>2</sup> ]
P320	66,28	65,76	0,52
P320 odtuszczana	67,94	65,32	2,63
P320 płukana wodą	65,54	56,31	9,23



**Rys. 2.** Zestawienie wytrzymałości połączeń klejowych (a) dla stali 1.0426 i wartością składowej dyspersyjnej energii swobodnej (b): 1 – po obróbce narzędziem ściernym P320, 2 – po obróbce narzędziem ściernym P320 i odtłuszczeniu preparatem Loctite 7061, 3 – po obróbce narzędziem ściernym P320 i płukaniu wodą wodociągową

**Fig. 2.** The comparison of adhesive joint strength with a) a dispersive component of free energy for steel 1.0426 b): 1 – after processing with P320 abrasive tool, 2 – after processing with P320 abrasive tool and degreasing with Loctite 7061, 3 – after processing with P320 abrasive tool and water rinsing

Porównując poszczególne składowe energii swobodnej można wskazać na pewną zależność pomiędzy częścią właściwą niepolarną swobodnej energii powierzchniowej a wytrzymałością co przedstawiono na rysunku 2.

Uzyskane wyniki badań nie pozwalają jeszcze na jednoznaczne określenie typu związku gdyż wymaga to dalszych analiz również z uwzględnieniem innych metod wyznaczania swobodnej energii powierzchniowej np. metody van Ossa-Gooda [11].

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania i analizy dają podstawy twierdzić, że na wartość energii powierzchniowej wpływają w znaczącym stopniu procesy obróbki konstytuujące stan geometryczny powierzchni. Posiadając odpowiednie informacje o zależnościach energetycznej warstwy wierzchniej danego materiału od cech stereometrycznych powierzchni jesteśmy w stanie tak planować procesy obróbki wiórowej i ścierniej, by uzyskać optymalny stan energetyczny warstwy wierzchniej. Wydatnie przyczynia się to do obniżenia kosztów obróbki a także zwiększa żywotność danego wytworu. Funkcja określająca wartość energii powierzchniowej jest złożona nie tylko ze względu na wielość czynników mających bezpośredni wpływ na jej wartość, lecz również ze względu na niestałość czasową jej właściwości. Należy tu również nadmienić, że intensywność zmian właściwości fizycznych lub chemicznych w poszczególnych obszarach warstwy wierzchniej wytworzonej w wyniku procesów technologicznych lub eksploatacyjnych jest nierównomierna.

Na podstawie przeprowadzonych badań możemy stwierdzić, że na poprawę właściwości adhezyjnych warstwy wierzchniej stali 1.0426 wpływa obróbka narzędziami ściernymi jak też odtłuszczenie. Obserwowany wzrost pracy adhezji po płukaniu wodą związany jest z aktywacją procesów utleniania, co nie gwarantuje lepszego jakościowo połączenia adhezyjnego w przypadku stali. Produkty korozji są bowiem słabo związane z materiałem rodzimym.

Interesującym wydaje się poszukiwanie zależności pomiędzy częścią dyspersyjną energii powierzchniowej a wytrzymałością połączenia klejowego, co być może pozwoli na wyznaczenie zależności pozwalających na dokładniejszy opis właściwości adhezyjnych stali węglowych. Jak wskazują badania oraz analizy stanu warstwy wierzchniej przedstawione w pracach [10, 12] nie można określić ścisłej zależności pomiędzy odpowiadającymi wartościami pracy adhezji oraz wytrzymałością połączenia na podstawie czego można przypuszczać, że kąt zwilżania nie może być jedynym w przypadku stali wskaźnikiem jakości przygotowania warstwy wierzchniej do klejenia i uszczelniania. Ma to istotne znaczenie praktyczne, gdyż nie zawsze termodynamiczną miarę oceny właściwości adhezyjnych można wykorzystać bezpośrednio w praktyce.

Dla wszystkich przedstawionych materiałów wykazano wpływ rozwinięcia powierzchni materiałów oraz czystości chemicznej na wytrzymałość połączeń, co

świadczy o zależności pomiędzy wytrzymałością połączeń adhezyjnych, a energetycznym stanem warstwy wierzchniej.

## LITERATURA

1. Domińczuk J.: Design basis of surface layer energetic states. The 4-th International Scientific Conference – Development of metal cutting, DMC 2002: 91–94.
2. Domińczuk J.: Synteza wpływu wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych. Przegląd Mechaniczny, 6, 2006: 23–28.
3. Kuczmaszewski J.: Fundamentals of metal-metal adhesive joint design. Lublin University of Technology & Polish Academy of Sciences, Lublin 2006.
4. Domińczuk J., Szabelski J.: Measurements of the work of adhesion for different structural materials typical surface treatment methods. In: A. Świć, J. Lipski (Ed.) “Management and control of manufacturing processes”. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin 2011: 137–147.
5. Domińczuk J.: Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej materiałów konstrukcyjnych. Postępy Nauki i Techniki, 9, 2011: 28–37.
6. Kuczmaszewski J.: Podstawy konstrukcyjne i technologiczne oceny wytrzymałości adhezyjnych połączeń metali. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1995.
7. Domińczuk J.: Wpływ wybranych czynników konstrukcyjnych i technologicznych na wytrzymałość połączeń klejowych. Postępy Nauki i Techniki, 10, 2011: 14–26.
8. Godzimirski J.: Wytrzymałość doraźna konstrukcyjnych połączeń klejowych. WNT, Warszawa 2002.
9. Rudawska A., Czarnota M.: Wpływ operacji odtłuszczania na właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej oraz wytrzymałość połączeń klejowych blach miedzianych. Postępy Nauki i Techniki, 8, 2011: 137–147.
10. Kuczmaszewski J., Domińczuk J.: Właściwości adhezyjne warstwy wierzchniej stali konstrukcyjnych. Przegląd Mechaniczny, 3, 2001.
11. Żenkiewicz M., Gołębiewski J., Lutomirski S.: Doświadczalna weryfikacja niektórych elementów metody van Ossa-Gooda. Polimery, 3, 1999.
12. Dragoni E., Mauri P.: Cumulative static strength of tightened joints bonded with anaerobic adhesives. Proc. Instn. Mech. Engrs., Vol. 216, Part L “J. Materials: Design and Applications”, 2001: 9–15.

## THE INFLUENCE OF ENERGETIC STATE OF SURFACE LAYER ON STRENGTH OF ADHESIVE JOINT

### Summary

The energetic characteristic of surface layer was introduced in the article. Parameters which essentially influence the surface energy were isolated. The paper presents also the results of the research on the influence of energetic proprieties of surface layer on the strength of joint. The results of research were used for comparative analysis of the degree of surface geometrical development and suitable work of adhesion and value of dispersive component of surface energy.

**Keywords:** surface energy, adhesive joints, strength, technological factors.