

ZASTOSOWANIE POMIARÓW SWOBODNEJ ENERGII POWIERZCHNIOWEJ DO OCENY ODPORNOŚCI NA ZACIERANIE ADHEZYJNE

THE APPLICATION OF FREE SURFACE ENERGY MEASUREMENT TO VALUATION OF ADHESIVE SCUFFING

W artykule przedstawiono wpływ obróbki plastycznej na zimno na stan energetyczny warstwy wierzchniej aluminium, oceniany za pomocą pomiarów swobodnej energii powierzchniowej. Próbkę poddanej takiej metodzie obróbkowej poddano także badaniom odporności na zacieranie w skojarzeniu ze stalowymi przeciwpróbkami. Badania prowadzono w warunkach smarowania substancjami o różnych mechanizmach oddziaływania ze smarowaną powierzchnią. Stwierdzono, że wzrost swobodnej energii powierzchniowej wpływa na spadek odporności na zacieranie dla skojarzeń smarowanych substancjami nieaktywnymi powierzchniowo. Odporność ta wzrastała natomiast dla skojarzeń smarowanych substancjami chemicznie reagującymi z powierzchnią.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, stan energetyczny, swobodna energia powierzchniowa, zacieranie adhezyjne, kąt zwilżania.

This paper presents the influence of cold plastic working to energy conditions of the aluminium surface layer evaluated with the use of measurements of free surface energy. Samples being subjected to such working method, were also subjected to scuffing resistance tests in pairs with steel counter-samples. The tests were carried out in conditions of lubrication with substances of different interaction mechanisms with the lubricated surface. They found out that the increase of free surface energy influences the scuffing resistance decrease for pairs lubricated with surface non-active substances. However, this resistance increases for the pairs lubricated with substances reacting chemically with the surface.

Keywords: surface layer, energy conditions, free surface energy, adhesive scuffing, wetting angle.

1. Wprowadzenie

Stan warstwy wierzchniej jest niezwykle istotny z punktu widzenia niezawodności i trwałości elementów systemu tribologicznego. Wynika to przede wszystkim z faktu, że system taki narażony jest na zjawiska i procesy generowane wskutek tarcia, w związku z czym, ich lokalizacja ma miejsce na ogół w obrębie warstwy wierzchniej. Przyjmując jako punkt wyjścia definicję zaproponowaną w pracy [6], stan warstwy wierzchniej scharakteryzować można jako ilościowo i jakościowo określony zespół własności warstwy wierzchniej. Własności te natomiast przedstawia się za pomocą wzajemnie powiązanych parametrów kreujących obraz warstwy wierzchniej na etapie jej wytwarzania bądź też eksploatacji. Używane do tego celu parametry mogą zostać zestawione w trzech grupach: geometrycznej (profilometryczne i stereometryczne), fizykochemicznej (skład chemiczny, struktura krystaliczna, twardość, stan naprężeń itp.) oraz energetycznej (swobodna energia powierzchniowa itp.). Współcześnie wyróżnić można bardzo dużą liczbę parametrów (szczególnie geometrycznych), które wykorzystywane są do opisu stanu warstwy wierzchniej.

We współczesnej tribologii coraz większą uwagę zwraca się na energetyczne aspekty konstytuowania warstwy wierzchniej, w których to upatruje się źródła implikacji niektórych zjawisk oraz procesów (np. zacierania adhezyjnego). Uwzględniając opis termodynamiczny i elektronowy, stan energetyczny warstwy wierzchniej można określić jako ilościową charakterystykę jej potencjału termodynamicznego będącego efektem poziomu energii jaki zmagazynowany został w elementarnych składnikach jej

1. Introduction

The condition of the surface layer is very important from the point of view of reliability and durability of elements of tribological system. Above all, it comes from the fact that such system is endangered to phenomena and processes generated in the effect of friction, so they are usually localized within the surface layer. Assuming as a starting point the definition proposed in the work [6], the surface layer condition can be characterized as a quantitatively determined set of properties concerning the surface layer. These properties, however, are presented with the use of mutually bound parameters creating a picture of the surface layer on the stage of its occurrence or service. The parameters applied for this purpose can be gathered in three groups: geometrical (profilometric and stereometric), physicochemical (chemical analysis, crystal structure, hardness, stress state, etc.) and energetic (free surface energy, etc.). Nowadays, we can enumerate a lot of parameters (especially geometrical) which are applied for description of surface layer condition.

In the contemporary tribology, more and more attention is paid to the surface layer formation energetic aspects which are regarded to be sources of implication of certain phenomena and processes (e.g. adhesive scuffing). Taking into account thermodynamic and electron conditions, the energetic condition of the surface layer can be determined quantitative characteristics of its thermodynamic potential being the effect of the energy level stored in its structure components (atoms, particles and their bonds) and resulting from its crystal lattice configuration.

The consequence of such conjuncture is the search for an optimum parameter, characterizing surface layer energy condi-

struktury (atomach, cząsteczkach i łączących je wiąźaniach) oraz wynikającego z ukształtowania jej sieci krystalicznej.

Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest poszukiwanie optymalnego parametru charakteryzującego stan energetyczny warstwy wierzchniej, którego obserwacje i pomiary umożliwiłyby sterowanie własnościami tej warstwy pod kątem jej odporności na zużywanie.

Wydaje się, że parametrem, który obecnie najlepiej nadaje się do tego celu jest swobodna energia powierzchniowa. Wielkość ta określana jest co prawda bezpośrednio na powierzchni ciała stałego, ale jej wartość wynika m. in. ze struktury elektronowej warstwy wierzchniej - co pozwala na obserwację zmian jej stanu energetycznego.

Znane są inne metody pozwalające na ocenę energii zakumulowanej w warstwie wierzchniej, jednakże rezultaty otrzymywane w konsekwencji ich realizacji nie są korelowane z odpornością na zużywanie czy zacieranie. Do ciekawszych propozycji należy zaliczyć tutaj metodę dyfrakcji elektronów wstecznie rozproszonych EBSD (ang. electron back-scattered diffraction), wykorzystywaną w celu wyjaśnienia mechanizmów zmian struktury krystalicznej stali poddanych obróbce plastycznej na zimno, a następnie poddanych procesom rekrytalizacyjnym [3]. W metodzie tej energia zakumulowana w warstwie wierzchniej szacowana jest na podstawie energii granicznej sąsiednich bloków jej ziaren oraz średnicy dyslokacji.

Interesującą propozycją jest także zastosowanie metody elementów skończonych, którą autorzy pracy [2] z powodzeniem zastosowali do określania energii zakumulowanej w składnikach sieci krystalicznej metali odkształczanych plastycznie. W tym przypadku akumulowana podczas deformacji energia obliczana jest w oparciu o wyznaczenie w każdym elemencie wartości naprężeń stycznych. Do wyznaczenia tej wartości konieczna była znajomość gęstości dyslokacji, modułu Kirchoffa oraz wartości bezwzględnej wektora Burgera.

Literatura przedmiotu proponuje jeszcze kilka innych metod, które z różną dokładnością pozwalają na określanie energii zakumulowanej w warstwie wierzchniej. Warto tutaj zwrócić uwagę na prace zespołu J. Kaczmarka [4], a ponadto metodę wykorzystującą promieniowanie rentgenowskie [1] oraz zbliżoną do niej metodę stosującą wiązkę neutronów [5].

W tym miejscu należałoby uwzględnić jeszcze aspekt możliwości realizacyjnych wyznaczania energii zakumulowanej w warstwie wierzchniej na podstawie zaproponowanych metod. Propozycje te odznaczają się stosunkowo skomplikowaną metodyką oraz wymagają zaawansowanej i kosztownej aparatury, przez co ich wykorzystanie ogranicza się przede wszystkim do działalności naukowej. W praktyce stricte inżynierskiej zdecydowanie szersze zastosowanie znajduje łatwiej mierzalna energia powierzchniowa.

Wiele spośród technologicznych metod pozwalających na zwiększanie odporności na zużywanie wpływa także na zmianę stanu energetycznego warstwy wierzchniej. Do metod tych zalicza się zwłaszcza te, które wykorzystują efekt odkształcenia plastycznego na zimno - a więc np. zgniot powierzchniowy. Obok korzystnych zmian jakie wprowadzają te obróbki (z tribologicznego punktu widzenia dotyczy to przede wszystkim ich chropowatości i twardości), efektem zgniotu jest akumulacja energii w warstwie wierzchniej. W konsekwencji warstwa wierzchnia wykazuje zwiększoną skłonność do inicjacji i rozwoju wielu procesów fizykochemicznych takich jak adsorpcja, dyfuzja czy też adhezja. Objawiać się to może m. in. zwiększoną skłonnością do

tions, observations and measurements of which would enable to control the layer properties from the point of view of its wear resistance. Free surface energy seems to be, at present, the best parameter for this purpose. Although this value is determined immediately on the surface of the solid, its value arises from the surface layer electron structure - allowing to observe its changing energy conditions.

There are known other methods letting valuation of energy accumulated in the surface layer, however results obtaining in the consequence of their realization do not correlate with a wear or scuffing resistance. It is necessary to include the electron back-scattered diffraction method to the most interesting proposition here, which is using to explain mechanisms of crystal structure changes in steels putted to cold working, and afterwards to recrystallization processes [3]. In this method, the energy accumulated in the surface layer is evaluated on the basis of boundary energy in its grains blocks and dislocation diameter.

The interested proposition is also the utilization of the finite element method, which the authors of research [2] used with success to determine the energy accumulated in components of crystal lattice of cold worked metals. In this case accumulated during deformation energy is calculated on the basis of determination in each element a value of shearing stresses. To evaluation this value there is necessity of knowledge of dislocation density, the Kirchoff's rigidity modulus and the Burgers vector absolute value.

The professional literature proposes another methods, which with different precision let to evaluate accumulated in surface layer energy. It is worth to take into consideration research of J. Kaczmarek's team [4], and moreover a X-ray method [1] and similar to it neutron diffraction method [5].

In this site, it would be necessary to take into account the aspect of realization possibilities of accumulated in the surface layer energy determination on the basis of proposed methods. These propositions are distinguished by relatively complicated methodology and require advanced and expensive apparatus, therefore their utilization is limited to scientific activity. In the engineering practice, definitely more popular is application of easier measurable free surface energy.

A lot of technology methods allowing to increase the wear resistance, can also influence the change of the surface layer energy conditions. The methods include especially those which make use of the cold plastic deformation effect - i.e., for example, surface cold work. Apart from favourable changes introduced by these works (from tribological point of view it refers mainly to their roughness and hardness), the cold work effect is energy accumulation in the surface layer. As a result, the surface layer shows an increased tendency to initiation and development of many physicochemical processes, such as adsorption, diffusion or adhesion. It can be manifested, among others, by the increased tendency to the occurrence of adhesive tacking and their domination in the matter of occurrence of reactive layers. Due to this intensified phenomenon, certain wear forms to which the surface layer is subjected - mainly tribochemical, adhesive, abrasive and corrosive wear - can be accelerated. Among the forms, especially dangerous wear forms are the ones characterized by intensive course and leading to kinematic pair emergency stoppage, in particular adhesive scuffing.

The subject literature does not give unequivocal information on the influence of cold plastic work to scuffing resistance. The example can be here the works [7,8], where, depending on the

powstawania szperein adhezyjnych i ich dominacj nad powstawaniem warstwek reakcyjnych. Wskutek intensyfikacji tego zjawiska przyspieszeniu ulega mogą również niektóre formy zużywaną, na które narażona jest warstwa wierzchnia, w tym glownie zużywanie tribochemiczne, adhezyjne oraz ściernokorozyjne. Spośród nich szczególnie niebezpieczne są te formy zużywania, które odznaczają się intensywnym przebiegiem i prowadz do awaryjnego unieruchomienia węzła kinematycznego, zwaszcza zacieranie adhezyjne.

Literatura nie podaje jednoznacznych informacji na temat wplywu obróbki plastycznej na zimno na odporno na zacieranie. Przykładem mogą być tutaj prace [7,8], w których w zależności od zastosowanych materialów pary trącej oraz substancji smarującej odnotowano zarownie wzrost jak i spadek odporności na zacieranie wskutek nagniatania. Niewiele informacji znaleźć można także na temat wplywu obróbki plastycznej na zimno stopów aluminium w kontekście ich odporności na zużywanie i zacieranie. Uwzględniając powyższe fakty, celem tego referatu jest ocena stanu energetycznego warstwy wierzchniej stopu aluminium AlMg2 po zgniocie i jego wplywu na odporno na zacieranie.

2. Przygotowanie próbek i metodyka badań

Do badań wykorzystano próbki wykonane ze stopu aluminium AlMg2 przeznaczonego do obróbki plastycznej, dla których stopnie zgniotu dobrano na podstawie wykresów umocnienia. Materiał wyjściowy nie by poddany obróbce plastycznej, a zastosowane stopnie zgniotu odpowiadały w przybliżeniu połowie odcinka proporcjonalnego wzrostu umocnienia (ok. 20 %) oraz w pobliżu „nasylenia” zgniotem (ok. 40 %). Próbki poddano zgniotowi na prasie o dużym nacisku, po czym - celem nadania im jednakowej chropowatości, szlifowano je ręcznie papierem ściernym o ziarnistości 500.

Przeciwprobki wykonano ze stali 45 i poddano hartowaniu w oleju i odpuszczaniu – w efekcie uzyskano twardo 45 ± 2 HRC.

Swobodną energię powierzchniową wyznaczano na podstawie pomiarów kata zwilżania na powierzchni próbek. Do tego celu zastosowano goniometr PG3 firmy Fibro System AB, w którym próbki umieszczano po uprzednim czyszczeniu w acetonie i suszeniu. Na powierzchni tak przygotowanych próbek osadzano krople wody o specjalnej czystości i diiodometanu o objętości 2 μ l. Krople osadzono metod tzw. kropli uwolnionej, polegającej na tym, że jest ona uwalniana z aplikatora natychmiast po tym, jak nastąpi kontakt z podłozem. Kąt zwilżania pomiędzy powierzchnią próbki a płaszczyzn styczna do powierzchni kropli mierzono po ustaleniu warunków równowagi. Za stan równowagi przyjmowano warunki, w których wartoc kata zwilżania stabilizowała się (tj. przestawała zmniejszc się w wyniku rozpływu kropli po powierzchni). Procedurę pomiaru kata zwilżania powtarzano 10-krotnie, po czym dla uzyskanej wartości średniej wyznaczano (za pomocą oprogramowania goniometru opartego o metodę dyspersyjno-polarną) swobodną energię powierzchniową. Dla każdego rodzaju próbek wykonano 12 powtórzeń wyznaczania wartości swobodnej energii powierzchniowej.

Próby odporności na zacieranie przeprowadzono na maszynie tarcowej Amsler A135, a charakterystyczną dla niej geometrię pary tracej pokazano na rys. 1.

Badania realizowano przy prędkoci ślizgowej $v = 0,4$ m/s, oraz obciażeniu przykadnym według procedury pokazanej na

applied friction pair materials and lubricating substances, they found out both the increase and decrease of scuffing resistance due to burnishing. Also, there is very little information on the influence of cold plastic work of aluminium alloys in the context of their wear and scuffing resistance. Taking the above facts into account, the purpose of this paper is to evaluate the energy conditions of the AlMg2 aluminium alloy surface layer after cold work and its influence to the scuffing resistance.

2. Preparation of samples and methods of tests

For tests they applied samples, made of AlMg2 aluminium alloy, designed for plastic work, for which the degree of cold work was matched on the basis of consolidation diagram. The initial material was not subjected to plastic work and the applied degrees of cold work complied, approximately, a half of the section of the consolidation proportional increase (ab. 20 %) and near the cold work “saturation” (ab. 40 %). The samples were subjected to cold work on the high pressure and then – in order to obtain the same roughness, they were hand grinded with the use of abrasive paper of granularity 500.

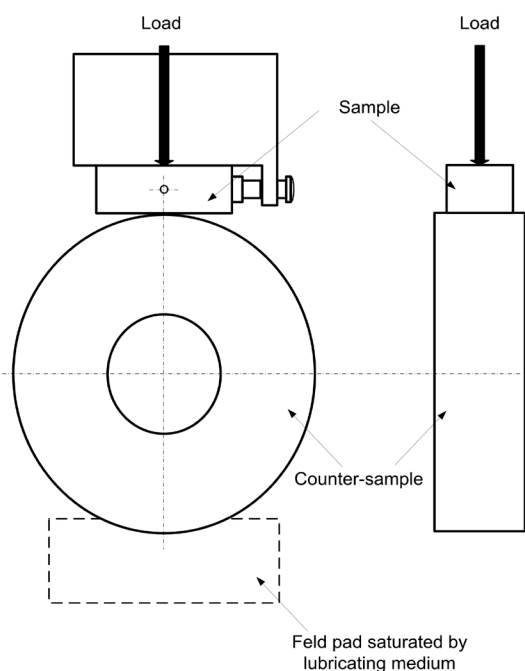
Counter-samples were made of steel 45 and subjected to quenching in oil and tempering – in the effect hardness 45 ± 2 HRC was obtained.

Free surface energy was determined on the basis of wetting angle parameters on the surface of the samples. For this purpose, they applied the goniometer PG3 of the firm Fibro System AB, where the samples were put after cleaning them with acetone and drying. On the surface of so prepared samples, they put water of special cleanness and diiodomethane drops (and volume 2 μ l). The drops were put with the use of so called released drop method, it means that the drop is released from the applicator immediately after the contact with the base. The wetting angle between the sample surface and the plane being tangent to the drop surface was measured after the balance conditions were established. As balance conditions they assumed the conditions where the wetting angle value was stabilizing (i.e. it stopped decreasing in the effect of drop spreading on the surface). The wetting angle measurement procedure was repeated 10 times, and then, for the obtained average value, they determined (with the use of goniometer software basing on the so called polar-dispersive method) free surface energy. For each kind of samples, determining free surface energy value was repeated 12 times.

Scuffing resistance tests were performed on the friction machine Amsler A135, and its characteristic friction pair geometry was shown in the figure 1.

The tests were carried out at sliding speed $v = 0.4$ m/s, and load applied according to the procedure shown in the fig. 2 (du-

rys. 2 (podczas próby stopniowo zwiększano siłę docisku próbki do przeciwpróbki).



Rys. 1. Geometria pary trącej wykorzystanej w próbie odporności na zacieranie na maszynie tarcowej Amsler A135

Fig. 1. Geometry of friction pair used in scuffing test performed on the Amsler A135 friction machine

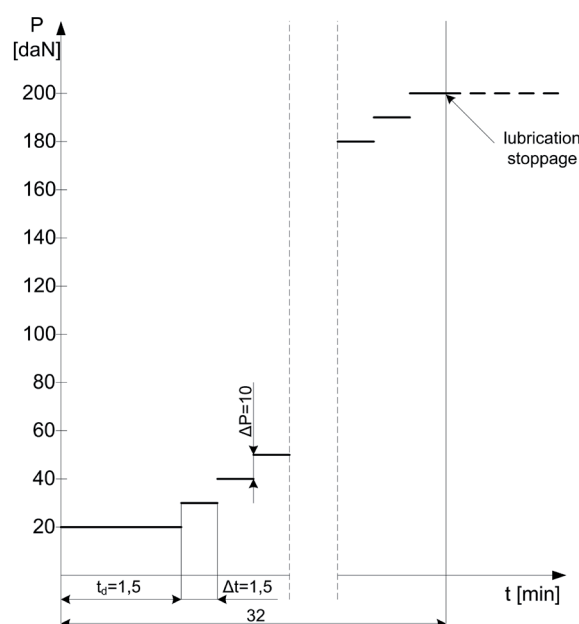
Parę trącą smarowano za pomocą poduszki filcowej nasączonej substancją smarującą. Do każdej próby stosowano nową poduszkę filcową. Substancje smarujące dobrano uwzględniając mechanizm ich oddziaływania z powierzchnią metalu podczas tarcia. W związku z tym do smarowania zastosowano:

- olej parafinowy, jako substancję nieaktywną, oddziałującą jedynie swoją lepkością,
- 0,05 molowy roztwór alkoholu n-cetylowego w oleju parafinowym jako substancji zdolnej do adsorpcji fizycznej na smarowanej powierzchni,
- 0,05 molowy roztwór dwusiarczku dwubenzylu (substancja zdolna do chemisorpcji oraz tworzenia polimerycznych starzeń) w oleju parafinowym.

Koniec próby zacierania następował kiedy zaobserwowano pierwsze symptomy procesu zacierania. Jako kryterium jego wystąpienia przyjęto nagły wzrost i niestabilność momentu tarcia wraz z pojawieniem się śladów szepienia na próbce. Jeżeli inicjacja zacierania nie nastąpiła przed przyłożeniem największego obciążenia, tj. 200 daN, przerywano smarowanie prowadząc próbę do chwili jego wystąpienia.

Zastosowano dwie miary odporności na zacieranie: czas mierzony od początku próby do momentu jego wystąpienia oraz nacisk jednostkowy odpowiadający początkowi zacierania. W niektórych przypadkach wartości tych miar nie były zgodne, tj. najkrótszemu czasowi do wystąpienia zacierania nie zawsze odpowiadał najmniejszy nacisk. Uwzględniając ten fakt wprowadzono uogólniony wskaźnik odporności na zacieranie W_{oz} będący iloczynem czasu do wystąpienia zacierania i odpowiadającego mu naciskowi powierzchniowemu. Wskaźnik W_{oz} wykorzystano do oceny odporności na zacieranie.

ring the test, force of pressing the sample to counter-sample was increased gradually).



Rys. 2. Procedura przykładania obciążenia w próbie odporności na zacieranie: P - obciążenie, ΔP - przyrost obciążenia, t - czas, t_d - czas docierania, Δt - czas pracy pod danym obciążeniem

Fig. 2. Procedure of load applying in the scuffing research (energy conditions valuation by free surface energy): P - load, ΔP - load increment, t - time, t_d - running-in time, Δt - work time under a given load

The friction pair was lubricated with the use of a felt pad absorbed with lubricant. They used a new felt pad for each test. Lubricants were chosen depending on the mechanism of their interaction with the metal surface during friction. So, they applied for lubrication:

- paraffin oil, as non-active substance influencing only through its viscosity,
- 0.05 molar solution of n-cetyl alcohol in paraffin oil as substance able to physical adsorption on the lubricated surface,
- 0.05 molar solution of dibenzyl disulfide (substance able to chemisorption and polymer ageing creation) in paraffin oil.

The end of the scuffing test took place when first symptoms of the scuffing process were observed. As a criterion of its occurrence, they assumed a sudden increase and instability of the friction moment, together with the appearance of tacking traces on the sample. If scuffing initiation did not occur before the application of the highest load, i.e. 200 daN, lubrication was stopped and the test was continued to the moment of its occurrence.

They applied two scuffing resistance measures: time measured from the beginning of the test to the moment of scuffing occurrence and specific force respective to the scuffing beginning. In certain cases, the values of these measures were not consistent, i.e. the shortest time to scuffing occurrence was not always respective to the lowest pressure. Taking this fact into account, they introduced a generalized scuffing resistance index W_{oz} being the ratio of time before scuffing occurrence and the respective surface pressure. The W_{oz} index was used for scuffing resistance evaluation.

Dla każdej kombinacji zastosowanych substancji smarujących i stopni zgniotu wykonywano trzy próby odporności na zacieranie. Jako punkt odniesienia w stosunku do próbek zgniatanych stosowano próbki szlifowane, niepoddawane obróbce plastycznej na zimno.

3. Wyniki badań i ich dyskusja

Na rys. 3 zestawiono wartości wyznaczonych, według omówionej wcześniej procedury, średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej dla poszczególnych rodzajów próbek. Dla każdej z nich obliczono przedziały ufności wartości średniej, dla przyjętego poziomu istotności równego 0,1.

Rys. 3 obrazuje wyraźny wzrost swobodnej energii powierzchniowej jaki charakteryzuje próbki zgniatane w stosunku do próbek szlifowanych. Jest on szczególnie widoczny przy porównaniu wartości swobodnej energii powierzchniowej dla próbek szlifowanych i poddanych maksymalnemu, przyjętemu zgniotowi (tj. 40 %). Różnica jaka charakteryzuje wartości średnie dla obu tych metod obróbkowych wynosi ok. $13 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (dla próbek szlifowanych średnia wartość swobodnej energii powierzchniowej wynosiła $43,48 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, a dla próbek poddanych 40 % zgniotowi – $56,77 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

Na rys. 4 zaprezentowano zależność uogólnionego wskaźnika odporności na zacieranie od stopnia zgniotu próbki oraz zastosowanej substancji smarującej.

Analiza zaprezentowanych na rys. 4 wyników wskazuje na pewne tendencje zarysowujące się w zależności od kombinacji rodzaju obróbki próbek i substancji smarującej. W przypadku smarowania skojarzenia substancją smarującą nie oddziałującą chemicznie z powierzchnią (olej parafinowy, 0,05 molowy roztwór alkoholu n-cetylowego w oleju parafinowym) zauważyć można spadek odporności na zacieranie dla próbek poddanych zgniotowi powierzchniowemu. Fakt ten jest spowodowany prawdopodobnie wzrostem stanu energetycznego warstwy wierzchniej wskutek obróbki plastycznej na zimno (co pokazano na rys. 3). Przekłada się to na szybsze osiągnięcie przez warstwy wierzchnie badanych materiałów energetycznego progu szczypania, co implikuje powstawanie szczepień adhezyjnych a w konsekwencji zacieranie.

Nieco inaczej układa się odporność na zacieranie skojarzeń smarowanych substancjami czynnymi chemicznie w stosunku do

For each combination of applied lubricants and degrees of cold work, they carried out three scuffing resistance tests. As a reference point for crushed samples, they applied ground samples being not subjected to cold plastic work.

3. Results of tests and discussion

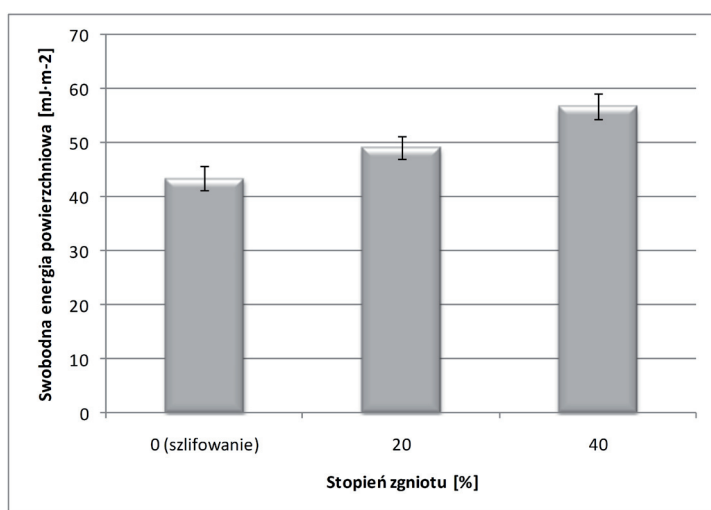
In the fig. 3, they presented values determined according to the earlier discussed procedure, average values of free surface energy for individual kinds of samples. For each of them, they calculated reliable ranges of the average value, for the assumed importance level being 0.1.

The fig. 3 shows a distinct increase of free surface energy characterizing crushed samples in relation to the ground ones. This can be seen, especially when comparing free surface energy values for ground samples being also subjected to maximum assumed cold work (i.e. 40 %). The difference characterizing average values for the both work methods is ab. $13 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$ (for ground samples the average value of the free surface energy was $43.48 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$, and for the samples subjected to 40% cold work – $56.77 \text{ mJ}\cdot\text{m}^{-2}$).

In the fig. 4, they presented dependence of the generalized scuffing resistance index on the cold work degree and on the applied lubricant.

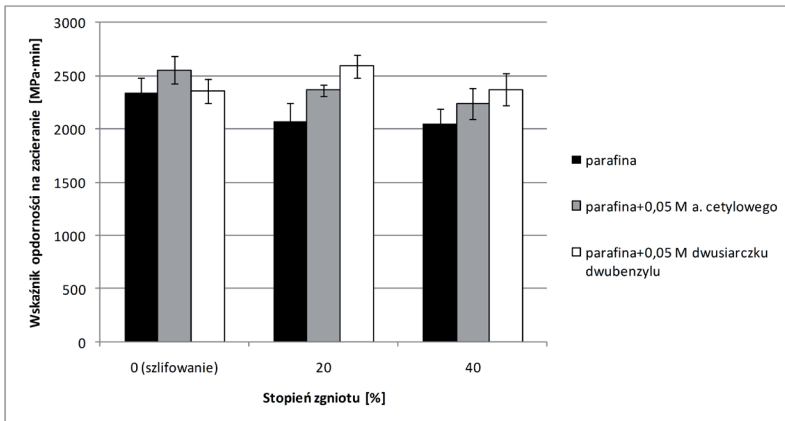
The analysis of the results presented in the fig. 4 shows that there are certain tendencies depending on the combination of a kind of work applied on samples and of a lubricant. In case of pair lubrication with the lubricating substance not reacting chemically with the surface (paraffin oil, 0.05 molar solution of n-cetyl alcohol in paraffin oil) one can observe the scuffing resistance decrease for the samples being the subject of the surface cold work. This fact, is probably caused by the increase of surface layer energy conditions in the effect of the cold plastic work (which is presented in the fig. 3). This means quicker achievement of energetic tacking threshold by the surface layers of the tested materials, which implies the occurrence of adhesive tacking, and in the effect – scuffing.

Slightly different looks the scuffing resistance of pairs lubricated with chemically active substances in relation to the interacting surfaces. In case of the pair lubricated with 0.05 molar solution of dibenzyl disulfide in paraffin oil, one can see a slight



Rys. 3. Średnie wartości swobodnej energii powierzchniowej w zależności od zastosowanej metody obróbki

Fig. 3. Average values of free surface energy depending on used treatment method



Rys. 4. Zależność wskaźnika odporności na zacieranie od stopnia zgniotu i rodzaju substancji smarującej

Fig. 4. Dependence of scuffing index resistance on cold work degree and type of lubricating medium

współpracujących powierzchni. W przypadku skojarzenia smarowanego 0,05 molowym roztworem dwusiarczku dwubenzylu w oleju parafinowym zauważalny jest niewielki wzrost odporności na zacieranie dla próbek o zgniotcie 20 % i brak pogorszenia tej odporności (w stosunku do próbek szlifowanych) dla próbek o zgniotcie 40 %. W tym przypadku, podwyższony stan energetyczny wykorzystywany jest jako akcelerator reakcji chemicznej pomiędzy pobudzoną energetycznie powierzchnią a aktywnymi składnikami substancji smarującej. Prowadzi to do szybszego powstawania warstwek granicznych zabezpieczających powierzchnię przed powstawaniem szperein adhezyjnych. Dopiero przy największym z zastosowanych stopni zgniotu zaobserwować można, że odporność na zacieranie kształtuje się na poziomie próbek szlifowanych. Wskazuje to na taką sytuację, w której powstawanie szperein zaczyna odgrywać dominującą rolę w styku tarciovym, nie pozwalając na odbudowę warstwek granicznych. Zastosowanie jeszcze większego zgniotu prawdopodobnie prowadziłoby do wyraźnego spadku odporności na zacieranie.

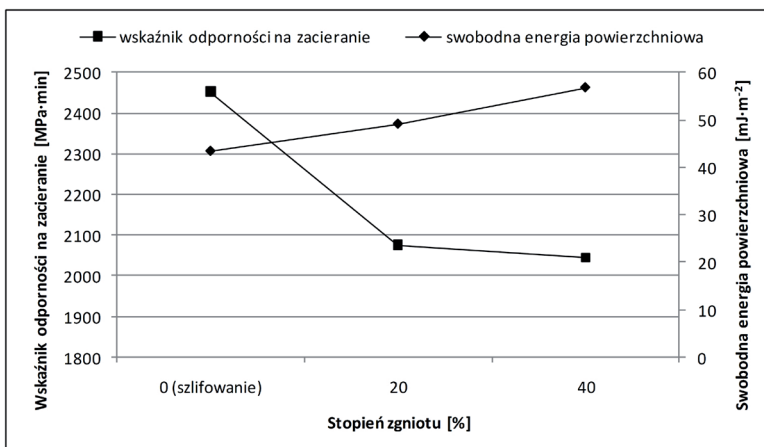
Podsumowując otrzymane rezultaty badań, na rys. 5 i 6 porównano przebieg zmian odporności na zacieranie dwóch najbardziej oczywistych przypadków (smarowanie olejem parafinowym i olejem parafinowym z dodatkiem dwusiarczku dwubenzylu) z wartościami swobodnej energii powierzchniowej dla różnych stopni zgniotu.

Przebiegi wartości na wykresach zaprezentowanych na rys. 5 i 6 graficznie interpretują dyskutowane wcześniej otrzymane wartości swobodnej energii powierzchniowej i wskaźnika od-

increase of scuffing resistance for samples of 20 % cold work and the lack of the resistance deterioration (in relation to ground samples) for samples of 40 % cold work. In this case, the increased energy condition is used as an accelerator of chemical reaction between the energetically provoked surface and lubricating substance active components. This leads to quicker occurrence of boundary layers protecting the surface against the occurrence of adhesive tacking. Only when the highest degree of cold work is applied, one can observe that the scuffing resistance is on the level of the ground samples. This indicates the situation in which the tacking occurrence starts being dominating in the friction contact, not allowing for the reconstruction of boundary layers. The application of even greater cold work would, probably, cause the distinct decrease of the scuffing resistance.

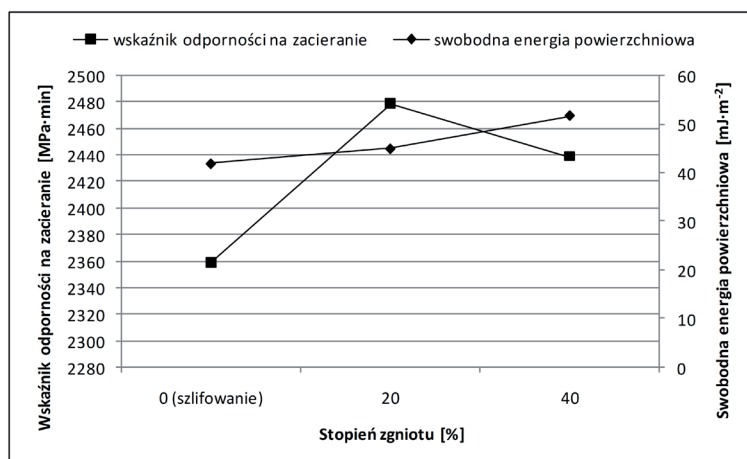
Summing up the obtained tests results, in the fig. 5 and 6 they compared the course of changes of scuffing resistance on the example of two most obvious cases (lubrication with paraffin oil and paraffin oil with the addition of dibenzyl disulfide) with the values of free surface energy for different degrees of cold work.

Courses of values in the diagrams presented in the figs. 5 and 6 graphically interpret the earlier discussed obtained values of free surface energy and scuffing resistance index. In case of the pair lubricated with paraffin oil, one can observe that the free surface energy increase is accompanied by the scuffing resistance decrease. In the other case, when the pair is lubricated with paraffin oil with dibenzyl disulfide being surface active, the free surface energy increase means the scuffing resistance increase.



Rys. 5. Zmiany wartości swobodnej energii powierzchniowej i wskaźnika odporności na zacieranie dla skojarzenia smarowanego olejem parafinowym

Rys. 5. Changes of values of free surface energy and scuffing resistance index for sliding pair lubricated by paraffin oil



Rys. 6. Zmiany wartości swobodnej energii powierzchniowej i wskaźnika odporności na zacieranie dla skojarzenia smarowanego 0,05 molowym roztworem dwusiarczku dwubenzylu w oleju parafinowym

Fig. 6. Changes of values of free surface energy and scuffing resistance index for sliding pair lubricated by 0.05 molar solution of dibenzyl disulfide in paraffin oil

porności na zacieranie. W przypadku skojarzenia smarowanego olejem parafinowym zaobserwować można, że wzrostowi swobodnej energii powierzchniowej towarzyszy spadek odporności na zacieranie. W drugim przypadku, gdy skojarzenie smarowane jest olejem parafinowym z czynnym powierzchniowo dwusiarczkiem dwubenzylu, wzrost swobodnej energii powierzchniowej przekłada się na wzrost odporności na zacieranie.

4. Podsumowanie

Reasumując otrzymane wyniki badań należy stwierdzić, że akumulacja energii w warstwie wierzchniej przekłada się na spadek odporności na zacieranie. Wniosek taki dotyczy skojarzeń, do smarowania których zastosowano substancje smarujące nie oddziaływujące chemicznie z warstwą wierzchnią. Podwyższenie stanu energetycznego warstwy wierzchniej wskutek obróbki plastycznej na zimno (w tym przypadku zgniotu powierzchniowego) powoduje prawdopodobny wzrost aktywności elementów jej struktury atomowej i tym sposobem staje się „motorem napędowym” różnych zjawisk i procesów, w tym m. in. adhezji.

W następstwie przyspieszony zostaje proces powstawania szepień adhezyjnych, co ma z kolei bezpośrednie przełożenie na intensywność zużycia adhezyjnego warstwy wierzchniej i jego patologicznej postaci – zacierania.

Ten sam mechanizm można jednakże wykorzystać do osiągnięcia wzrostu odporności na zacieranie – jeżeli do smarowania skojarzenia zastosowana zostanie substancja chemicznie czynna w stosunku do współpracującej powierzchni. W takim przypadku, energetyczne pobudzenie warstwy wierzchniej można wykorzystać do akceleracji kształtowania się warstwek granicznych powstających w wyniku reakcji dodatków przeciwwzartarciowych substancji smarującej i smarowanej powierzchni.

Zaprezentowane wyniki badań stanowią wstęp do zakrojonego na znacznie większą skalę eksperymentu badającego wpływ stanu energetycznego warstwy wierzchniej na jej odporność na zużycie i zacieranie adhezyjne. Badania takie byłyby szczególnie istotne dla materiałów jednoimiennych (np. stalowych), których podatność na szepianie adhezyjne jest znacznie wyższa niż w przypadku skojarzeń różnoimiennych (tak jak w przypadku prezentowanego skojarzenia stal-stop aluminium).

4. Conclusions

Summarizing the obtained results, it should be stated that the energy accumulation in the surface layer means the scuffing resistance decrease. Such conclusion concerns pairs which were lubricated with the use of lubricants not reacting chemically with the surface layer. The increased energy condition of the surface layer in the effect of cold plastic work (including the case of surface cold work) causes the probably activity increase of its atomic structure elements and thus it becomes “motion work” of different phenomena and processes, including also adhesion. As a result, the process of adhesive tacking occurrence is accelerated which in turn influences directly the intensity of surface layer adhesive wear and its pathological form – scuffing.

However, the same mechanism can be used to achieve the scuffing resistance increase – if for the pair lubrication is used the substance being chemically active in relation to the interacting surface. In such case, the energetic impulse on the surface layer can be used to accelerate the creation of boundary layers occurring in the effect of reaction between lubricating substance antiscuffing additives and the lubricated surface.

The presented tests results can be the beginning of a much wider range experiment researching the influence of the surface layer energy conditions on its scuffing resistance and adhesive scuffing. Such research works would be especially important for monomial materials (e.g. steel) which show much higher tendency towards adhesive tacking than in case of heteronamed pairs (as in case of the presented pair steel-aluminium).

5. References

1. Borbely A, Driver J.H, Ungar T. An X-ray method for the determination of stored energies in texture components of deformed metals. Application to cold worked ultra high purity iron. *Acta Materialia* 2000; 48: 2005-2016.
2. Choi S.H. Simulation of stored energy and orientation gradients in cold-rolled interstitial free steels. *Acta Materialia* 2003; 51: 1775-1788.
3. Choi S.H, Jin Y.S. Evaluation of stored energy in cold-rolled steels from EBSD data. *Materials Science & Engineering* 2004; A371: 149-159.
4. Gadaj S.P, Kaczmarek J, Ollifieruk W. Proces magazynowania energii podczas rozciągania metalu. *Prace IPPT PAN* 1983; 28: 3-13.
5. Rajmohan N, Hayakawa Y, Szpunar J.A, Root J.H. Neutron diffraction method for stored energy measurement in interstitial free steel. *Acta Materialia* 1997; 45: 2485-2494.
6. Szule S, Stefko A. *Obróbka powierzchniowa części maszyn - podstawy fizyczne i wpływ na własności użytkowe*. Warszawa: WNT, 1976.
7. Wojciechowski Ł, Nosal S. Wpływ nagniatania naporowego na odporność na zacieranie. *Tribologia* 2007; 213: 411-420.
8. Wojciechowski Ł, Pawelczyk K. Kształtowanie warstwy wierzchniej o podwyższonej odporności na zacieranie. *Inżynieria Materiałowa* 2008; 166: 1058-1063.

Dr inż. Łukasz WOJCIECHOWSKI

Dr hab. inż. Stanisław NOSAL

Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych

Politechnika Poznańska

Ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, Polska

e-mail: lukasz.wojciechowski@put.poznan.pl

e-mail: stanislaw.nosal@put.poznan.pl
