

Tomasz TRZEPIECIŃSKI  
Politechnika Rzeszowska

## WPŁYW STANU UTWARDZENIA BLACH MOSIĘŻNYCH ORAZ ALUMINIOWYCH NA WARTOŚĆ OPORÓW TARCIA

W pracy przedstawiono wpływ stanu utwardzenia blachy oraz struktury geometrycznej powierzchni blachy, opisanych parametrami przestrzennymi, na wartość oporów tarcia. Ponadto analizowano wpływ warunków tarcia na zmianę topografii powierzchni blachy. Do opisu zjawiska tarcia wykorzystano próbę przeciągania paska blachy. Wartość współczynnika tarcia wyznaczono dla warunków tarcia suchego oraz smarowania olejem maszynowym. Próby tarcia przeprowadzono dla blach mosiężnych oraz aluminiowych o różnym stanie utwardzenia. Jak wynika z przeprowadzonych badań, stan utwardzenia blachy oraz topografia powierzchni blach istotnie wpływają na charakter zmian trybologicznych związanych z występowaniem oporów tarcia.

**Słowa kluczowe:** tarcie, współczynnik tarcia, wytłaczanie

### Wprowadzenie

Główne czynniki wpływające na zjawiska tribologiczne w procesach przeróbki plastycznej to m.in. makro- i mikrogeometria styku, kinematyka ruchu narzędzi, dynamika obciążeń, czynniki fizykochemiczne na powierzchni rozdziału pary trącej oraz temperatura [1, 2]. W procesie tłoczenia można wyróżnić kilka obszarów zróżnicowanych pod względem stanu naprężeń, stanu odkształceń, prędkości przemieszczeń i warunków tarcia: kołnierz wytłoczki, obszar krawędzi ciągowej stempla i matrycy, ściankę i dno wytłoczki. Rolę i skutki występowania oporów tarcia trudno jednoznacznie zdefiniować. Do niekorzystnych skutków występowania oporów tarcia należą m. in. [2]:

- nierównomierność odkształceń, powodująca zmiany grubości ścianki wytłoczki,
- wzrost nacisku wywieranego przez stempel, spowodowany oporami tarcia w dociskaczu i na krawędzi matrycy, powodujący niebezpieczeństwo oderwania dna wytłoczki,
- wzrost naprężeń promieniowych, zwiększających ryzyko powstania pęknięć w wytłoczce,

- zmniejszenie trwałości narzędzi oraz pogorszenie gładkości powierzchni wytłoczki.

Do korzystnego wpływu oporów tarcia na proces tłoczenia można zaliczyć tarcie odkształcanej blachy o powierzchnię stempla, gdyż zwiększa wartość maksymalnej siły wytłaczania. Pod wpływem rozciągania siłą osiową wytłoczka jest obciskana na powierzchni bocznej stempla. Powstała w ten sposób na powierzchni styku stempla i blachy siła tarcia powoduje odciążenia niebezpieczne ze względu na zerwanie obszaru przejścia ścianki bocznej w dno wytłoczki. Niekorzystnemu zjawisku tarcia można przeciwdziałać poprzez stosowanie odpowiednich smarów i zwiększenie twardości narzędzi. W trakcie procesu odkształcania smar powoduje zmianę topografii powierzchni, chropowatości, charakteru płynięcia metalu odkształcanego, zmniejszenie nacisku jednostkowego, zmniejszenie współczynnika tarcia oraz polepszenie jakości powierzchni wyrobu. Ponadto, przez zastosowanie odpowiednich smarów uzyskuje się bardziej równomierny poślizg w strefie styku odkształcanego metalu z narzędziem i powstanie poduszki smarowej między współpracującymi powierzchniami. Prowadzi to do prawie całkowitego wyeliminowania połączeń tarcowych, powodując tym samym zmniejszenie oporów tarcia.

W modelowaniu plastycznego kształtowania blach najczęściej znajduje zastosowanie prawo tarcia Amontona-Coulomba, według którego opory tarcia nie zależą od nominalnej wielkości powierzchni styku i są proporcjonalne do obciążenia. Jednakże jest ono słuszne w pewnym ograniczonym zakresie, gdyż tarcie w znacznym stopniu zależy od prędkości poślizgu oraz zmieniającej się geometrii styku. Prawo Coulomba może być stosowane w zakresie naprężeń normalnych do powierzchni kształtowanej blachy, nieprzekraczających naprężeń uplastyczniających. Kształt powierzchni styku wpływa na rodzaj i stan naprężeń, głównie w warstwie wierzchniej. W rzeczywistości powierzchnie przylegają do siebie tylko wierzchołkami nierówności, które następnie, pod wpływem działania sił nacisku, zostają odkształcone plastycznie, aż powstała w ten sposób powierzchnia styku będzie wystarczająca do przeniesienia obciążenia.

Badania symulujące warunki tarcia i smarowania można podzielić na testy symulujące procesy i testy symulujące warunki tribologiczne [3]. Testy symulujące procesy mają za zadanie modelowanie operacji przeróbki plastycznej z zachowaniem kinematyki procesu. Testy symulujące warunki trybologiczne modelują określone zjawisko, często bez zachowania kinematyki procesu. Obie grupy testów można podzielić na próby z bezpośrednim lub pośrednim pomiarem współczynnika tarcia. W metodach pośrednich współczynnik tarcia jest wyznaczany na podstawie pomiaru innych wielkości, np. siły tarcia i siły normalnej. Na podstawie przyjętego modelu tarcia oblicza się wartość współczynnika tarcia. Wadą tego typu metod jest to, że umożliwiają wyznaczenie uśrednionej wartości współczynnika tarcia, natomiast nie umożliwiają pomiaru i określenia

rzeczywistych oporów tarcia. W próbach bezpośrednich następuje rzeczywisty pomiar naprężeń tarcia na powierzchniach styku.

Próby przeciągania pasa blachy polegają na przeciąganiu próbki zaciśniętej między dwoma przeciwpróbkami o powierzchni płaskiej, walcowej lub w postaci klina. Współczynnik tarcia jest określany na podstawie pomiaru siły docisku i siły ciągnięcia. W celu uzyskania różnych warunków tarcia stosuje się zmianę prędkości ciągnięcia próbki, zmiany siły docisku, warunków smarowania oraz wymiarów geometrycznych próbek. Stosowane różne kształty przeciwpróbek determinują występowanie różnych rozkładów naprężeń w strefie styku, powodując, że wyniki uzyskiwane w poszczególnych odmianach próby często nie są porównywalne. W procesie tłoczenia próbę przeciągania paska blachy przypisuje się do modelowania zjawiska tarcia między stemplem i ścianką wytłoczki. Istotną cechą wymienionej metody jest to, że umożliwia wyznaczenie wartości współczynnika tarcia uśrednionej dla całej powierzchni styku.

### **Badania doświadczalne**

Badania właściwości tarciovych blach przeprowadzono, stosując próbki wykonane z blachy mosiężnej oraz stopów aluminium w różnym stanie umocnienia. Przyjęto, że w warunkach prowadzonych prób nie będzie dochodzić do zmiany grubości blachy. W warunkach kontaktu z tarcie możliwe jest jedynie sprężysto-plastyczne odkształcanie wierzchołków nierówności pod wpływem lokalnych nacisków. Pozwoliło to na przeprowadzenie analizy porównawczej wielkości oporów tarcia blach o różnej grubości. Podstawowe parametry mechaniczne badanych blach wyznaczono w próbie jednoosiowego rozciągania pasów blachy wyciętych z arkusza blachy wzdłuż kierunku walcowania (tab. 1.). W celu wyznaczenia wartości współczynnika anizotropii plastycznej, w próbie jednoosiowego rozciągania stosowano ekstensometry do pomiaru zmian długości i szerokości próbek. Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej firmy Schenck, typ UTS 100, z komputerową rejestracją i analizą danych pomiarowych. Poszczególne blachy stosowane w badaniach oznaczono symbolami: materiał – grubość blachy w mm pomnożona przez 10 – stan materiału. W przypadku blach o grubości mniejszej niż 1 mm do oznaczenia grubości blachy dodano przedrostek 0. Na podstawie danych pomiarowych sporządzono charakterystyki umocnieniowe badanych blach, które następnie aproksymowano równaniem Hollomona.

Parametry chropowatości oparte na pomiarach liniowych mają luźny związek z wielkością oporów tarcia, gdyż chropowatość ma charakter przestrzenny. Trójwymiarowe obrazy nie tylko lepiej reprezentują naturę procesu współpracy dwóch elementów, ale pozwalają zarazem na przestrzenną analizę wielkości parametrów powierzchni. Dlatego wartości parametrów przestrzennych struktury geometrycznej powierzchni (SGP) blach określono w układzie 3D za pomocą

urządzenia pomiarowego Tyluscan 150 Precision firmy Taylor Hobson. W celu analizy wpływu oporów tarcia na zmianę chropowatości powierzchni blach, pomiary chropowatości przeprowadzono przed oraz po wykonaniu próby tarcia. Dołączone oprogramowanie Mountains Map Universal pozwoliło na wyznaczenie obrazów izometrycznych badanych powierzchni.

Tabela 1. Właściwości mechaniczne oraz wartości współczynnika tarcia badanych blach

Table 1. The mechanical properties and the friction coefficients of tested materials

Materiał blachy	Umowna granica plastyczności $R_{0,2}$ [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie $R_m$ [MPa]	Stała materiałowa C [MPa]	Wykładnik krzywej umocnienia n	Współczynnik tarcia	
					$\mu_{\text{suchy}}$	$\mu_{\text{olej}}$
AA5754_08_H14	220	288	376	0,12	0,21	0,20
AA5754_06_H18	192	290	381	0,15	0,19	0,13
AA5754_08_H24	179	280	385	0,16	0,14	0,11
M63_05_r	112	332	594	0,37	0,21	0,15
M63_07_z4	313	397	589	0,15	0,14	0,09
M63_05_z6	474	516	628	0,04	0,2	0,14

Uwzględniając wykaz podstawowych parametrów SGP zaproponowany w tzw. liście Birmingham 14 [4], jako parametry przestrzenne charakteryzujące SGP blach wytypowano (tab. 2.):

- średnie arytmetyczne nachylenie chropowatości  $S_a$ ,
- średnie kwadratowe nachylenie chropowatości  $S_q$ ,
- gęstość wierzchołków nierówności powierzchni  $S_{ds}$ ,
- średnie kwadratowe nachylenie nierówności powierzchni  $S_{dq}$ ,
- wskaźnik powierzchni nośnej (wskaźnik nośności)  $S_{bi}$ ,
- wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia  $S_{vi}$ .

Próbki do próby tarcia o długości około 200 mm i szerokości 20 mm wycięto wzdłuż kierunku walcowania. Przeciwp próbki w postaci rolek o średnicy 20 mm i szerokości 22 mm zostały wykonane ze stali NC6. Do badań użyto czterech kompletów rolek o parametrach chropowatości  $R_a$  równych  $0,63 \mu\text{m}$ , mierzonych równolegle do osi walców.

Próby tarcia przeprowadzono metodą przeciągania pasa blachy umieszczonego między dwoma walcowymi przeciwp próbkami (rys. 1.). W procesie tłoczenia próbę przeciągania paska blachy przypisuje się do modelowania zjawiska tarcia między stemplem i ścianką wytłoczki. Podczas badań za pomocą czujników tensometrycznych mierzono wielkość siły docisku oraz siły ciągnięcia. Z uwagi na to, że opory tarcia nie są stałe w czasie całego procesu odkształcenia plastycznego, do rejestracji danych zastosowano komputerową aparaturę pomiarową, pozwalającą na ciągły zapis wyników. W wyniku przeciągania blachy z prędkością  $0,4 \text{ mm/s}$  otrzymywano ok. 200 punktów pomiarowych dla każde-

go eksperymentu, droga tarcia w tych warunkach wynosiła ok. 7 mm. Prędkość przeciągania blachy była równa prędkości przemieszczania uchwytu maszyny wytrzymałościowej zastosowanej do badań. Stosowana w próbie siła docisku wynosiła 1,2 kN. Wartość siły docisku rolek zwiększano przy zatrzymanym przesuwie próbki.

Tabela 2. Parametry struktury geometrycznej powierzchni badanych blach

Table 2. The selected surface roughness parameters of the tested materials

Materiał	Warunki tarcia	Parametry amplitudowe		Parametry przestrzenne	Parametry hybrydowe	Parametry funkcjonalne	
		Sa [ $\mu\text{m}$ ]	Sq [ $\mu\text{m}$ ]	Sds [ $\text{l}_w/\text{mm}^2$ ]*	Sdq [ $\mu\text{m}/\mu\text{m}$ ]	Sbi	Svi
AA5754_08_H14	-	0,295	0,365	761	0,0355	0,233	1,65
	tarcie suche	0,42	0,524	694	0,0493	0,353	1,53
	smar	0,386	0,455	608	0,0491	0,297	1,64
AA5754_06_H18	-	0,298	0,381	739	0,0436	0,195	1,69
	tarcie suche	0,352	0,519	412	0,0469	0,66	1,52
	smar	0,303	0,378	722	0,0432	0,298	1,41
AA5754_08_H24	-	0,33	0,393	730	0,041	0,251	1,69
	tarcie suche	0,39	0,457	676	0,0451	0,288	1,51
	smar	0,354	0,437	455	0,0366	0,562	1,56
M63_05_r	-	0,162	0,205	807	0,0201	0,316	1,65
	tarcie suche	0,542	0,644	484	0,0431	0,385	1,42
	smar	0,528	0,604	451	0,0418	0,656	1,37
M63_07_z4	-	0,151	0,196	683	0,0183	0,107	1,54
	tarcie suche	0,268	0,355	676	0,0335	0,16	1,289
	smar	0,207	0,266	677	0,0307	0,269	1,37
M63_05_z6	-	0,108	0,137	764	0,0136	0,172	1,59
	tarcie suche	0,26	0,328	573	0,0211	0,446	1,41
	smar	0,166	0,219	714	0,0247	0,199	1,39

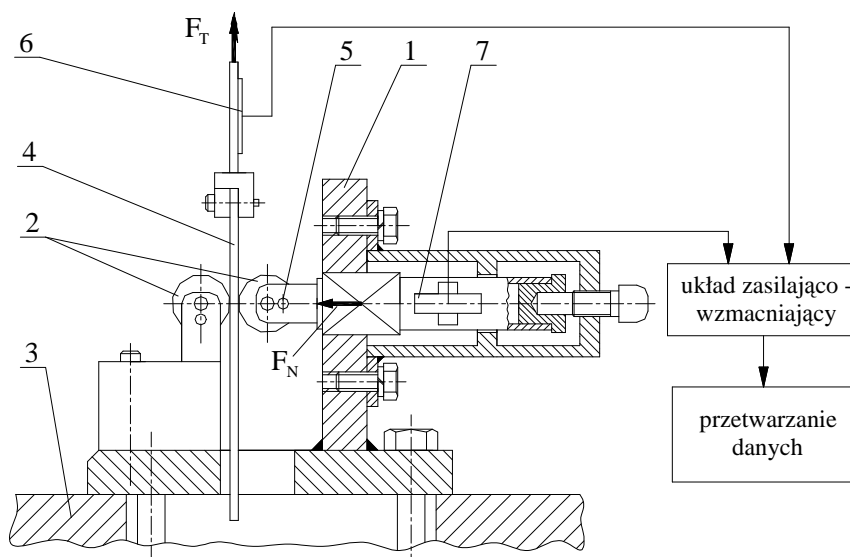
\* liczba wierzchołków/ $\text{mm}^2$

Próbie przeprowadzono w warunkach tarcia technicznie suchego oraz ze smarowaniem olejem L-AN46 obu powierzchni próbek. W celu wyeliminowania wpływu czynników zewnętrznych powierzchnia próbek i rolek została odtłuszczona za pomocą acetonu. Na podstawie przygotowanego zbioru danych wyznaczono za pomocą arkusza kalkulacyjnego Excel wartość współczynnika tarcia według zależności:

$$\mu = \frac{F_T}{2 \cdot F_N} \quad (1)$$

gdzie:  $F_T$  – siła ciągnięcia,  
 $F_N$  – siła docisku.

Zależność (1) jest słuszna w przypadku, gdy siła ciągnięcia  $F_T$  zależy tylko od oporów tarcia.



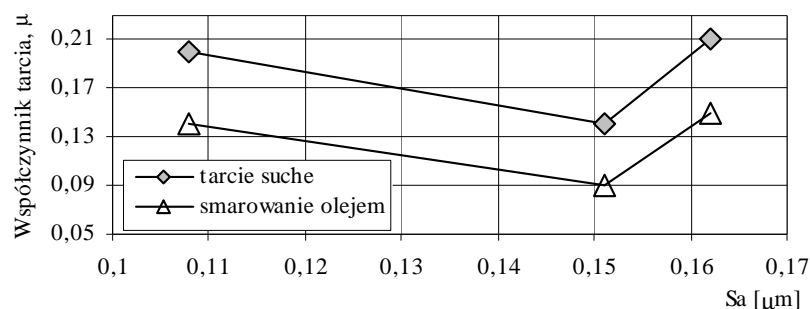
Rys. 1. Schemat przyrządu do badań: 1 – korpus, 2 – rolki robocze, 3 – podstawa, 4 – próbka, 5 – kołek blokujący, 6, 7 – tensometry

Fig. 1. Schematic view of strip drawing test: 1 – frame, 2 – working rolls, 3 – base, 4 – specimen, 5 – fixing pin, 6, 7 – load cell

## Wyniki i ich analiza

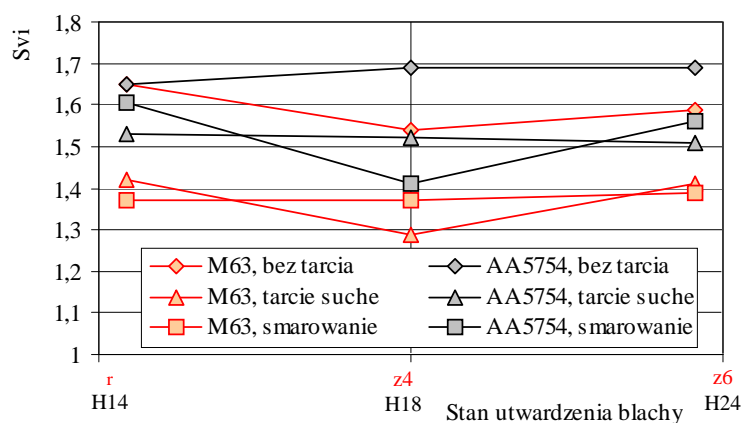
Dla wszystkich stosowanych blach użycie smaru powoduje zmniejszenie wartości współczynnika tarcia (tab. 1.). Dla blach mosiężnych stopień redukcji wartości współczynnika tarcia jest zbliżony niezależnie od wartości parametru  $S_a$  blachy (rys. 2.). Lokalne minimum wartości współczynnika tarcia może wynikać z odmiennej topografii powierzchni, cechującej się korzystnym rozkładem zagłębień mikronierówności. Dalszy wzrost współczynnika tarcia dla blachy o chropowatości  $S_a = 0,162$  jest spowodowany zwiększoną powierzchnią kontaktu oraz zmniejszeniem objętości wgłębień mogących pomieścić środek smaru (rys. 3.). Zarówno w przypadku tarcia suchego, jak i smarowania powierzchni

blachy olejem następuje zmniejszenie wskaźnika Svi oraz gęstości wierzchołków nierówności powierzchni Sds.



Rys. 2. Wartość współczynnika tarcia w zależności od parametru Sa chropowatości powierzchni blach mosiężnych

Fig. 2. Friction coefficient value as a function of surface parameter Sa of brass sheet metal

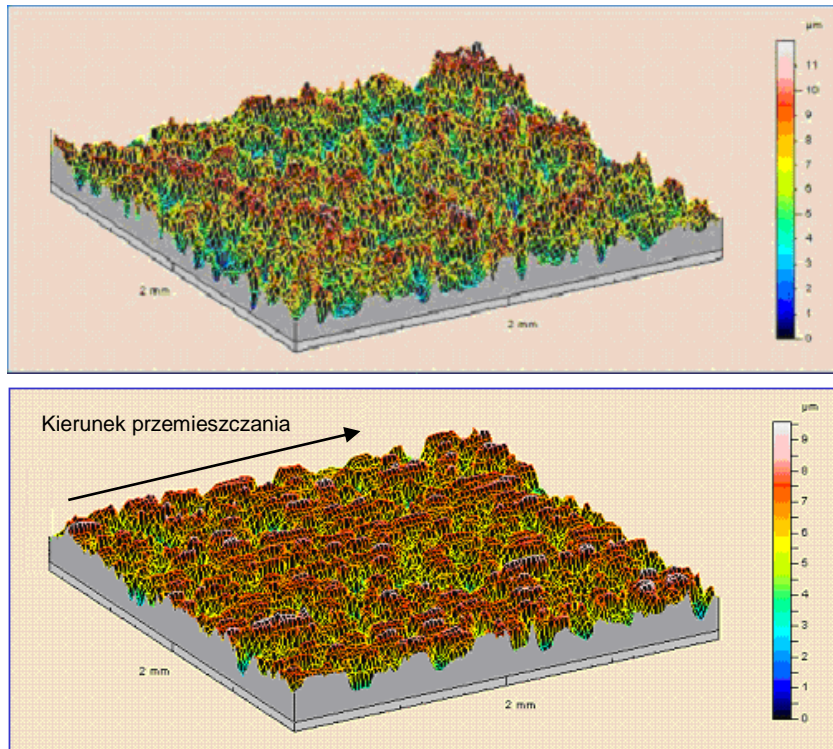


Rys. 3. Zmiana wskaźnika zatrzymania cieczy przez wgłębienia Svi

Fig. 3. Change of density of summits of the surface Svi

Ze zmianą warunków tarcia wiążą się zmiany właściwości warstwy wierzchniej próbek. Przeprowadzone pomiary parametrów struktury geometrycznej powierzchni blach po wykonaniu prób przeciągania paska blachy (tab. 2.) nie dały jednoznacznej odpowiedzi na pytanie o wpływ warunków tarcia na zmianę chropowatości powierzchni blach. Procesowi tarcia wszystkich blach towarzyszy zwiększenie parametru Sa. W przypadku M63\_07\_z4 oraz M63\_05\_z6 zastosowany smar w większym stopniu wpływał na zmniejszenie tego parametru. Można sądzić, że jest to spowodowane wygładzaniem po-

wierzchni blachy (rys. 4.) na skutek plastycznego zgniatania wierzchołków mikronierówności.



Rys. 4. Zmiana topografii powierzchni w wyniku zgniatania nierówności powierzchni blachy M63\_05\_z6 (tarcie suche)

Fig. 4. Change of surface topography as the result of surface roughness crushing of M63\_05\_z6 sheet metal (dry friction)

Na uwagę zasługuje fakt, że chropowatość blach mosiężnych i ze stopu aluminium jest mniejsza od chropowatości przeciwpróbek. Jak wiadomo, stopy aluminium cechują się skłonnością do zacierania, co prowadzi do charakterystycznych nalepień mikrocząstek materiału blachy na powierzchni narzędzia. Z powstającymi rysami na powierzchni blachy jest związany wzrost wartości parametrów chropowatości. Ewolucję pozostałych parametrów struktury geometrycznej powierzchni trudno jest jednoznacznie wytłumaczyć. Nawet przy podobnych wartościach podstawowych parametrów amplitudowych pozostałe parametry mogą znacząco różnić się między sobą, ponadto struktury o prawie jednakowych wysokościach nierówności zasadniczo różnią się od siebie pod względem topograficznym [5].



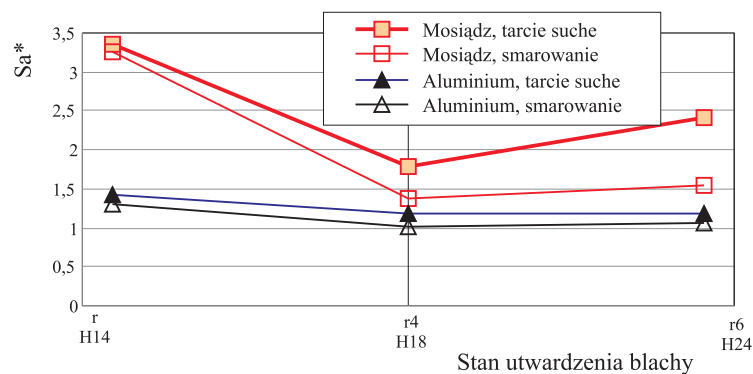
W celu zbadania wpływu stanu utwardzenia blachy na zmianę mikrostruktury w warunkach tarcia, wprowadzono pomocniczy parametr  $Sa_p$  zdefiniowany jako:

$$Sa^* = \frac{Sa}{Sa_0} \quad (2)$$

gdzie:  $Sa$  – końcowa wartość średniego arytmetycznego nachylenia chropowatości powierzchni,

$Sa_0$  – początkowa wartość średniego arytmetycznego nachylenia chropowatości powierzchni.

Zarówno dla blach mosiężnych (rys. 5.), jak też wykonanych ze stopu aluminium zaobserwowano podobny charakter zmian parametru  $Sa^*$ , niezależnie od występujących warunków tarcia. Blachy wyżarzane cechują się największą zmianą chropowatości pod wpływem występujących nacisków i oporów tarcia. Z kolei blachy w stanie półtwardym charakteryzują się najmniejszą zmianą chropowatości. Największa zmiana wartości parametru  $Sa$  w odniesieniu do powierzchni oryginalnej blachy występuje dla blach mosiężnych we wszystkich stanach utwardzenia. Blachy aluminiowe charakteryzują się niewielką zmianą SGP pod wpływem oporów tarcia.



Rys. 5. Wpływ stanu utwardzenia materiału blachy M63 oraz AA\_5754 na zmianę parametru  $Sa^*$

Fig. 5. Influence of sheet temper of M63 and AA5754 on the change of  $Sa^*$  parameter

## Wnioski

Jak wynika z przeprowadzonych badań, chropowatość powierzchni istotnie wpływa na charakter zmian trybologicznych związanych z występowaniem opo-

rów tarcia. Wydaje się, że czynnikiem pośrednim wpływającym na zmianę chropowatości powierzchni jest stan utwardzenia materiału blachy. Zespół procesów tribologicznych zachodzących w procesie tarcia powoduje wzrost wartości parametru amplitudowego  $S_a$ . Z tym że w przypadku blach mosiężnych największy wzrost wartości tych parametrów następuje w warunkach tarcia suchego. Niejednoznaczny charakter zmian parametrów  $S_{ds}$ ,  $S_{dq}$  oraz  $S_{bi}$  w trakcie próby tarcia można wytłumaczyć brakiem korelacji między podstawowymi parametrami amplitudowymi oraz sposobem określania poszczególnych parametrów.

### Literatura

- [1] Gierzyńska M.: Tarcie, zużycie i smarowanie w obróbce plastycznej metali, WNT, Warszawa 1983.
- [2] Matuszak A.: Factors influencing friction in steel sheet forming, J. Mat. Proc. Technol., 106 (2000), 250-253.
- [3] Świątkowski K.: Sposoby oceny wielkości tarcia na powierzchniach kontaktu niemetalicznego materiału modelowego i narzędzia, Obróbka Plastyczna Metali, nr 1 (2000), 21-23.
- [4] Stout K.J., Dong W.P., Mainsah E.: A proposal for standartisation of assessment of three-dimensional micro-topography – Part I Surface digitisation and parametric characterisation, University Birmingham 1993.
- [5] Oczko K.E., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni: podstawy klasyfikacji z atlasem charakterystycznych powierzchni kształtowanych, OW PRz, Rzeszów 2003.

### INFLUENCE OF TEMPER STATE OF BRASS AND ALUMINIUM SHEETS ON FRICTIONAL RESISTANCE

In this work was presented the influence of spatial surface parameters on frictional resistance value and the influence of frictional resistance on the change of the sheet surface topography. To describe the friction behaviour the strip drawing test was used. The friction coefficient value was determined under the "dry" and "lubricant" conditions. The friction tests were carried out for brass and aluminium sheet metals with different temper state. As results from the researches the temper state and the surface topography of the sheets really influences on the character of contact behaviour which results from frictional resistance existing.

**Keywords:** friction, coefficient of friction, deep drawing

*Złożono w Redakcji w listopadzie 2009 r.*