

MARIA MACIĄG\*

## **Analiza termodynamiczna cech systemu tribologicznego na przykładzie wybranych badań eksperymentalnych, cz. II**

### **Słowa kluczowe**

Pierwsza zasada termodynamiki, system tribologiczny, stałe kompleksowe systemowe „C” i „D”, opracowanie wyników badań.

### **Key- words**

First principle of thermodynamics, tribologic system, system complex constants „C” and „D”, experimental results.

### **Streszczenie**

W drugiej części pracy wykorzystano wyniki standardowych badań tarcia i zużycia [1, 2, 3] do ilościowego opisu wybranych systemów tribologicznych na podstawie modelu termodynamicznego przedstawionego w pierwszej części pracy [4]. Przedstawiono stałe kompleksowe systemowe „C” i „D” oraz opracowano sposób ich wyznaczania. Następnie wyznaczono: pracę właściwą zużycia, intensywność zużywania, prawdopodobieństwo powstania strumienia masy produktów zużycia tribologicznego oraz stosunek masy zużytej do masy nagrzonej do temperatury błysku jako funkcje temperatury. W podsumowaniu objaśniono znaczenie i zalety opisu systemów tribologicznych za pomocą stałych kompleksowych systemowych „C” i „D”. Na podstawie otrzymanych charakterystyk przedstawiono wnioski dotyczące przebiegu zjawisk zachodzących w styku tarcio-  
wym dwóch metali.

### **Wykaz ważniejszych oznaczeń**

- $a_{\text{dys}}$  – praca właściwa dyssypacji mechanicznej [J/g],
- $C$  – stała systemu tribologicznego [J/g],
- $c_p$  – ciepło właściwe [J/g·K],
- $D$  – stała systemu tribologicznego [K],

---

\* Katedra Informatyki, Politechnika Radomska, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom.

- $e_R^x$  – praca właściwa zużycia [J/g],  
 $dF$  – elementarna powierzchnia styku trących się ciał [m<sup>2</sup>],  
 $J$  – intensywność zużywania [g/m<sup>2</sup>·s],  
 $m$  – zużycie tribologiczne systemu [g],  
 $m_0$  – masa o temperaturze błysku nie usuwana ze strefy tarcia [g],  
 $\dot{m}$  – strumień masy produktów zużycia [g/s],  
 $p$  – nacisk jednostkowy [Pa],  
 $v$  – prędkość poślizgu względnego elementów systemu tribologicznego [m/s],  
 $\Theta$  – temperatura styku tarciovego ciał [K],  
 $\Theta_0$  – temperatura styku mikronierówności powierzchni [K],  
 $\mu$  – współczynnik tarcia kinetycznego,  
 $P$  – prawdopodobieństwo powstania strumienia masy produktów zużycia tribologicznego,  
 $\delta$  – stosunek mas  $m$  i  $m_0$ .

## 1. Wprowadzenie

W pracy [4] przedstawiono model termodynamiczny ustabilizowanego tarcia i zużywania ciał stałych [5, 6, 7, 8]. Model ten opisuje m.in. gęstości strumieni: ciepła, ciepła dyssypacji i entalpii oraz wielkości określające intensywność zużywania i odporność na zużywanie tribologiczne w zależności od: współczynnika tarcia, nacisku jednostkowego, prędkości poślizgu i temperatury. Na jego podstawie zostały sformułowane i zinterpretowane nowe wielkości określone jako stałe kompleksowe systemowe „C” i „D”. Dzięki tym stałym uzyskano znacznie uproszczoną wersję modelu, bardziej przydatną do wykorzystania w badaniach eksperymentalnych [4, 5, 7]. W niniejszej pracy korzystając z wyników badań tarcia i zużycia [1, 2, 3] oraz uproszczonego modelu ze stałymi „C” i „D” otrzymano częściowy opis zbadanych systemów tribologicznych. Uzyskano charakterystyki: intensywności zużywania  $J$ , pracy właściwej zużycia  $e_R^x$ , prawdopodobieństwa powstania strumienia masy produktów zużycia tribologicznego  $P$  i stosunku mas  $\delta$  w funkcji temperatury.

## 2. Stałe kompleksowe systemowe „C” i „D”

Uzyskany w pracach [4, 5, 6, 7, 8] system zależności stanowi ogólny, makroskopowy, analityczny opis procesów związanych z ustabilizowanym tarcieniem. Na jego podstawie wyznaczono dwie nowe wielkości fizyczne: stałą kompleksową systemu C:

$$C = c_p \cdot \Theta_o \quad (1)$$

i stałą kompleksową systemu D:

$$D = \frac{a_{\text{dys}}}{c_p} + \Theta_o \quad (2)$$

Stała C, o wymiarze dżul na gram, jest maksymalnym ciepłem jednostkowym dla danego systemu, bowiem odnosi się do maksymalnego zakresu zmian temperatury w tym systemie.

Stała D, wyrażana w kelwinach, jest to temperatura, większa od temperatury błysku, do której nagrzałyby się strefa styku nierówności powierzchni, gdyby praca tworzenia produktów zużycia została zamieniona na ciepło tarcia.

Stałe C i D można wyznaczyć z badań eksperymentalnych. Dzięki nim możliwe jest znaczące uproszczenie opisu systemu tribologicznego. Umożliwiają one również uzyskanie charakterystyk ilościowych (intensywności zużywania, pracy właściwej zużycia, prawdopodobieństwa powstania strumienia masy produktów zużycia tribologicznego i stosunku mas  $m$  i  $m_o$ ) dla systemu na podstawie wyników badań eksperymentalnych bez zastosowania kalorymetru. Wystarczająco dużo prostsze badania pracy właściwej zużycia z pomiarem temperatury. Znaczenie stałych systemowych C i D jest zasadnicze dla uzyskania poprawy powtarzalności i odtwarzalności wyników badań tribologicznych.

### **3. Zastosowanie nowych, stałych wielkości systemowych do opisanie procesów zachodzących w systemie tribologicznym na podstawie wyników standardowych badań tarcia i zużycia [5]**

W tej części artykułu zostaną opisane, na podstawie opracowanego modelu termodynamicznego procesu tarcia i zużywania ustabilizowanego metali, systemy tribologiczne, których badania zawierają informacje o pracy tarcia (nacisk jednostkowy, współczynnik tarcia, prędkość poślizgu, droga tarcia), temperaturze styku tarciovego, o zużyciu tribologicznym i o odporności na zużywanie. Nieznane pozostają jednak informacje o strukturze bilansu energetycznego, gdyż nie przeprowadzono odpowiednich badań. Jako przykłady systemów tribologicznych wybrano systemy opisane w pracach [1, 2, 3]. Ich ważną cechą jest zaplanowanie eksperymentu w sposób umożliwiający uwzględnienie termodynamicznej natury tarcia. W szczególności ważna rola przypadła temperaturze styku tarciovego, która była ustalana na żądanym poziomie za pomocą wymiennika ciepła. Była więc niezależnym parametrem procesu.

Opracowanie i wprowadzenie do opisu systemu tribologicznego kompleksowych stałych C i D dało nową możliwość jego scharakteryzowania. Powstała w ten sposób charakterystyka jest korzystna ze względu na jednoznaczność,

powtarzalność i porównywalność opisu. Wybrane przykłady systemów tribologicznych zaczerpnięto z prac [1, 3]. Mając dane trzy wartości pracy właściwej zużycia i odpowiadające im trzy wartości temperatury styku tarciovego, można skorzystać z zależności na pracę właściwą zużycia (3) w celu ustalenia wartości stałych C i D:

$$e_R^x = C \cdot \frac{D - \Theta}{\Theta} = \frac{C \cdot D}{\Theta} - C \quad (3)$$

Po sprowadzeniu jej do następującej postaci:

$$e_R^x \cdot \Theta = C \cdot D - C \cdot \Theta, \text{ zapisujemy równanie}$$

$$Y = -C \cdot X + C \cdot D \quad (4)$$

gdzie:  $Y = e_R^x \cdot \Theta$  oraz  $X = \Theta$ .

Tabela 1. Wyniki obliczeń stałych systemowych C i D dla przypadku systemu scharakteryzowanego w pracy [1] oraz gęstość strumienia  $\frac{dm_o}{dF}$

Table 1. Results of calculations over system constants C and D only for system characterized in work [1] and flux density  $\frac{dm_o}{dF}$

Współczynnik tarcia $\mu$	Prędkość poślizgu $v$ [m/s]	Naciski jednostkowe $p$ [MPa]	C $10^7$ [J/g]	s (C) $10^6$ [J/g]	D [K]	s (CD) $10^8$ [K]	Współczynnik korelacji k	$\frac{dm_o}{dF}$ $10^{-10}$ [ $\frac{g}{s \cdot m^2}$ ]
0,3	0,25	0,4	1,370	8,89	582,18	28,83	-0,8377	0,0220
		1,2	2,260	1,71	510,70	5,53	-0,9971	0,0398
	0,50	0,4	1,290	1,29	599,59	4,21	-0,9950	0,0462
		1,2	0,410	6,61	606,53	21,43	0,5279	0,0438
	1,00	0,4	2,710	2,41	493,88	7,81	-0,9961	0,0443
		1,2	3,670	11,98	451,42	38,82	-0,9507	0,0981
0,4	0,25	0,4	1,620	0,76	510,32	2,48	-0,9989	0,0247
		1,2	2,760	0,35	461,35	1,13	-0,9999	0,0435
	0,50	0,4	1,570	0,19	517,42	0,64	-0,9999	0,0510
		1,2	2,670	5,32	434,30	17,22	-0,9808	0,0899
	1,00	0,4	2,270	2,18	453,39	7,07	-0,9954	0,0705
		1,2	3,040	1,29	410,18	4,19	-0,9991	0,1580
0,5	0,25	0,4	3,730	5,20	383,21	16,86	-0,9904	0,0134
		1,2	2,720	7,51	380,11	24,32	-0,9640	0,0551
	0,50	0,4	2,620	0,79	386,29	2,56	-0,9995	0,0380
		1,2	1,260	2,23	427,29	7,24	-0,9847	0,2380
	1,00	0,4	1,950	6,06	392,42	19,64	-0,9551	0,1030
		1,2	0,130	4,77	1127,24	15,45	-0,2624	4,6200

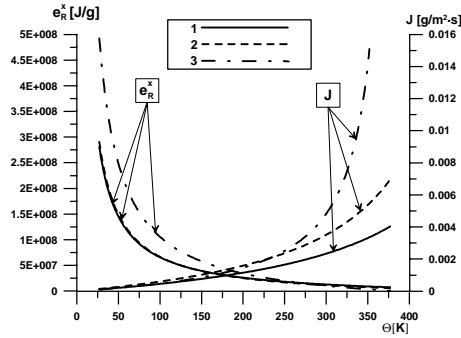
Dysponując trzema wartościami Y i trzema wartościami X tworzymy układ trzech równań:

$$\left. \begin{aligned} Y_1 &= -C \cdot X_1 + C \cdot D \\ Y_2 &= -C \cdot X_2 + C \cdot D \\ Y_3 &= -C \cdot X_3 + C \cdot D \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

z którego wynikają, na podstawie analizy regresji metodą najmniejszych kwadratów stałe C oraz iloczyn C·D, a więc również stała D [9]. Poniżej w tabelach 1 oraz 2 zestawiono wyniki obliczeń stałych C i D, ich odchylenia standardowe i współczynnik korelacji. Stałe te mogą służyć również do opisu intensywności zużycia J (wzór 6):

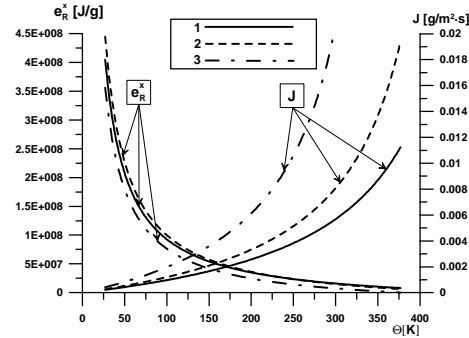
$$\mathbf{J} = \frac{d\dot{m}}{dF} = \mu \cdot p \cdot v \cdot \frac{\theta}{C \cdot (D - \theta)} \quad (6)$$

Na rysunkach 1–6 przedstawiono zależności pracy właściwej zużycia i intensywności zużycia wynikające z zaproponowanego opisu systemu tribologicznego – wzory (3) i (6) na przykładzie wyników badań J. Ciecieląga [1]. W niniejszej pracy zostały zaprezentowane tylko wybrane charakterystyki z pracy [5]. Na rysunkach 7 i 8 zilustrowano te zależności charakteryzujące systemy tribologiczne, które zbadali J. Sadowski i W. Żurowski [3].



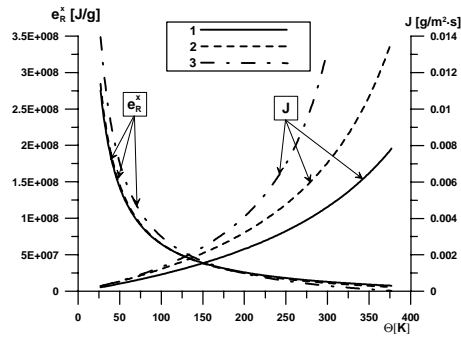
Rys. 1. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,25$  m/s i  $p = 0,4$  MPa

Fig. 1. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,25$  m/s and  $p = 0,4$  MPa



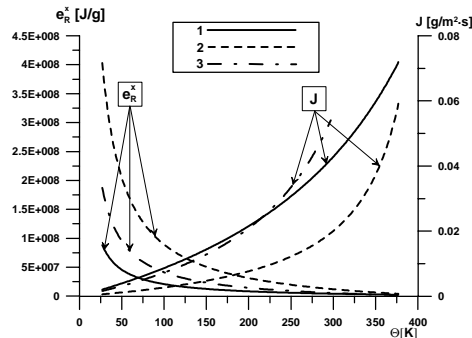
Rys. 2. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,25$  m/s i  $p = 1,2$  MPa

Fig. 2. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,25$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



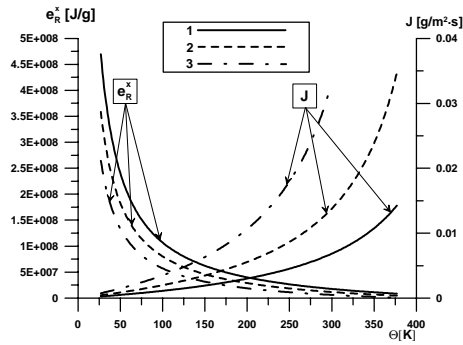
Rys. 3. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,5$  m/s i  $p = 0,4$  MPa

Fig. 3. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,5$  m/s and  $p = 0,4$  MPa



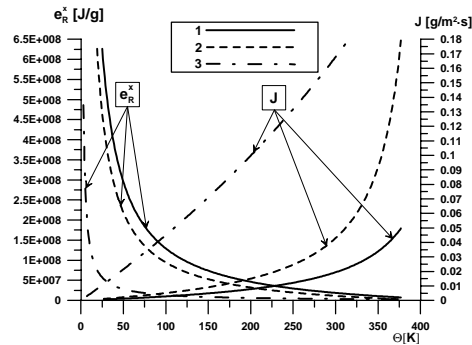
Rys. 4. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,5$  m/s i  $p = 1,2$  MPa

Fig. 4. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,5$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



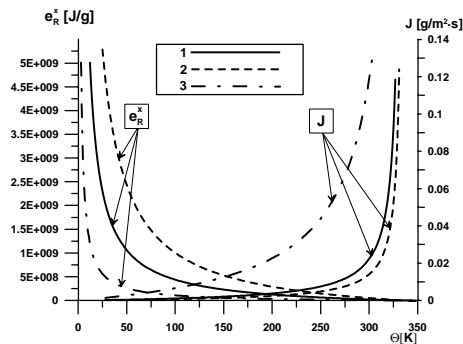
Rys. 5. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 1,0$  m/s i  $p = 0,4$  MPa

Fig. 5. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 1,0$  m/s and  $p = 0,4$  MPa



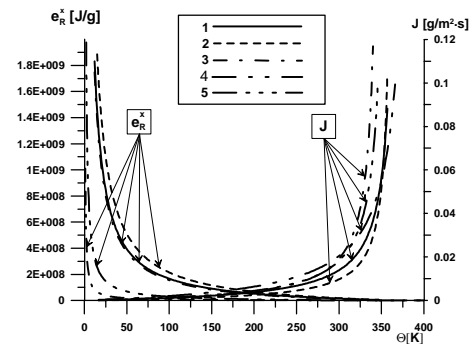
Rys. 6. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 1,0$  m/s i  $p = 1,2$  MPa

Fig. 6. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 1,0$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



Rys. 7. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla przypadku tarcia stopów żelaza: 1 – żelazo armco, 2 – stal gat. 45, 3 – stal gat. N8E (według danych z tabeli 2)

Fig. 7. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for case of friction the alloys of iron: 1 – iron armco, 2 – steel 45, 3 – steel N8E (according to data from table 2)



Rys. 8. Zależność intensywności zużycia  $J$  i pracy właściwej zużycia  $e_R^x$  od temperatury  $\Theta$  dla przypadku tarcia stopów nieżelaznych: 1 – miedź, 2 – glin, 3 – cynk, 4 – ołów, 5 – stop LC60 (według danych z tabeli 2)

Fig. 8. Temperature  $\Theta$  dependence of wear severity  $J$  and specific work of wear  $e_R^x$  for case of friction of non – ferrous alloys: 1 – copper, 2 – aluminium, 3 – zinc, 4 – lead, 5 – alloy LC60 (according to data from table 2)

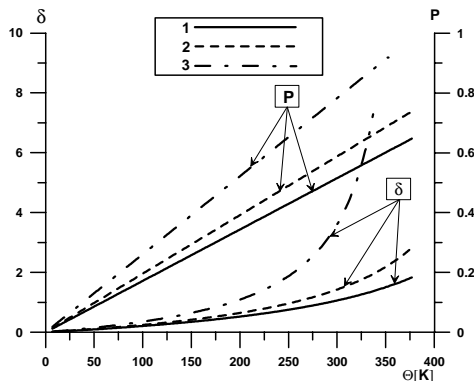
Według wcześniej przeprowadzonych rozważań, możliwa jest jeszcze dalsza charakterystyka systemów tribologicznych na podstawie znajomości stałych  $C$  i  $D$ . Mianowicie stałe te występują we wzorze (7) na gęstość strumienia masy  $\frac{d\dot{m}_0}{dF}$  nagrzewanej ciepłem dyssypacji do temperatury błysku przy założeniu, że nie zachodzi zużywanie, we wzorach (8) – na stosunek gęstości strumieni masy  $\frac{d\dot{m}}{dF}$  i  $\frac{d\dot{m}_0}{dF} - \delta$  i (9) na prawdopodobieństwo  $P$ , że nagrzanemu materiałowi obszaru styku nierówności do temperatury błysku będzie towarzyszyło utworzenie cząstki zużycia [4]:

$$\frac{d\dot{m}_0}{dF} = \frac{\mu \cdot p \cdot v}{C} \quad (7)$$

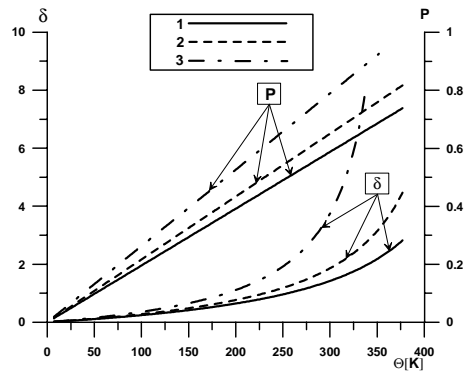
$$\delta = \frac{\Theta}{D - \Theta} \quad (8)$$

$$P = \frac{\Theta}{D} \quad (9)$$

W tabelach 1 i 2 zamieszczono wartości gęstość strumienia masy  $\frac{d\dot{m}_0}{dF}$  wyznaczone dla poszczególnych systemów tribologicznych.



Rys. 9. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,25$  m/s i  $p = 0,4$  MPa  
Fig. 9. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,25$  m/s and  $p = 0,4$  MPa



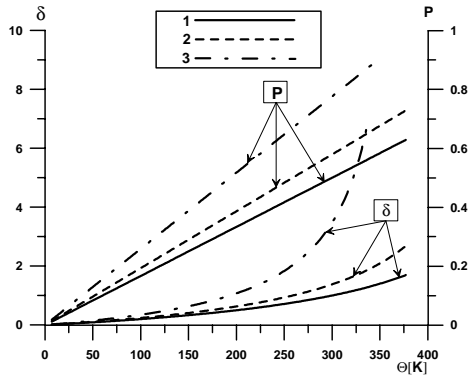
Rys. 10. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,25$  m/s i  $p = 1,2$  MPa  
Fig. 10. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,25$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



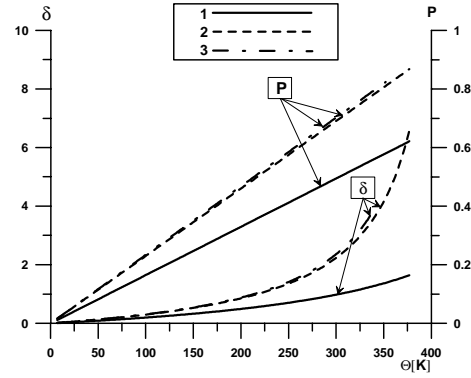
Tabela 2. Wyniki obliczeń stałych systemowych C i D dla przypadku systemu scharakteryzowanego w pracy [3] oraz gęstość strumienia  $\frac{dm_o}{dF}$

Table 2. Results of calculations over system constants C and D only for system characterized in work [3] and flux density  $\frac{dm_o}{dF}$

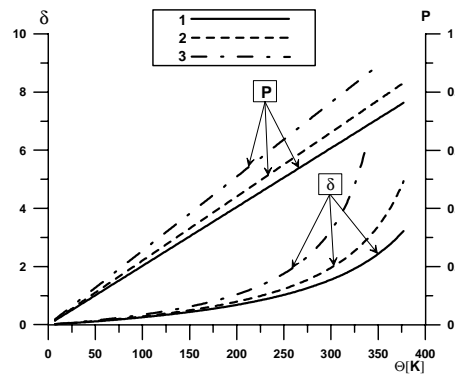
Metal	Warunki badań	Średnie wartości pracy właściwej $e_R^x(\Theta)$ [MJ·g <sup>-1</sup> ], wartości stałych C [MJ/g], D [K] i ich odchylenia standardowe s (C) [MJ/g] i s (CD) [MJ·K/g], współczynnika korelacji k i gęstości strumienia $\frac{dm_o}{dF} \cdot 10^{-10}$ [ $\frac{g}{s \cdot m^2}$ ]
żelazo armco (178 HV)	N = 19,62, $\Theta_1 = 298$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,6$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 900 s	$e_R^x(298) = 26,755$ ; $e_R^x(313) = 5,443$ ; $e_R^x(333) = 3,380$ ; C = 186,63; s (C) = 109,27; D = 333,96; s (CD) = 35396,69; $k = -0,863$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,252$
stal gat. 45 (220 HV)	N = 29,43, $\Theta_1 = 298$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,6$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 900 s	$e_R^x(298) = 62,409$ ; $e_R^x(313) = 15,692$ ; $e_R^x(333) = 9,083$ ; C = 425,99; s (C) = 229,78; D = 335,43; s (CD) = 74430,17; $k = -0,88$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,166$
stal gat. N8E (274 HV)	N = 29,43, $\Theta_1 = 298$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,6$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 900 s	$e_R^x(298) = 6,743$ ; $e_R^x(313) = 3,095$ ; $e_R^x(333) = 1,244$ ; C = 44,61; s (C) = 11,69; D = 340,01; s (CD) = 3789,83; $k = -0,967$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,158$
miedź (126 HV)	N = 9,81, $\Theta_1 = 293$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,51$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 600 s	$e_R^x(293) = 14,509$ ; $e_R^x(313) = 11,840$ ; $e_R^x(333) = 6,612$ ; C = 51,23; s (C) = 13,84; D = 379,09; s (CD) = 4483,36; $k = -0,965$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,326$
glin (81 HV)	N = 9,81, $\Theta_1 = 293$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,43$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 600 s	$e_R^x(293) = 19,263$ ; $e_R^x(313) = 11,108$ ; $e_R^x(333) = 8,437$ ; C = 70,86; s (C) = 21,65; D = 369,12; s (CD) = 7013,10; $k = -0,956$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,208$
cynk (44 HV)	N = 9,81, $\Theta_1 = 293$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 313$ K, $\mu = 0,5$ , $\Theta_3 = 333$ K, t = 600 s	$e_R^x(293) = 12,193$ ; $e_R^x(313) = 4,676$ ; $e_R^x(333) = 4,034$ ; C = 55,73; s (C) = 28,70; D = 351,16; s (CD) = 9298,12; $k = -0,889$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,315$
ołów (6 HV)	N = 0,49, $\Theta_1 = 293$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 303$ K, $\mu = 0,8$ , $\Theta_3 = 313$ K, t = 300 s	$e_R^x(293) = 0,785$ ; $e_R^x(303) = 0,635$ ; $e_R^x(313) = 0,429$ ; C = 4,79; s (C) = 0,59; D = 341,77; s (CD) = 191,96; $k = -0,992$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,6$
stop LC60 (8 HV)	N = 1,96 N, $\Theta_1 = 293$ K, $v = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ , $\Theta_2 = 303$ K, $\mu = 0,5$ , $\Theta_3 = 313$ K, t = 600 s	$e_R^x(293) = 2,392$ ; $e_R^x(303) = 1,341$ ; $e_R^x(313) = 0,939$ ; C = 20,35; s (C) = 5,26; D = 325,95; s (CD) = 1702,97; $k = -0,968$ ; $\frac{dm_o}{dF} = 0,353$



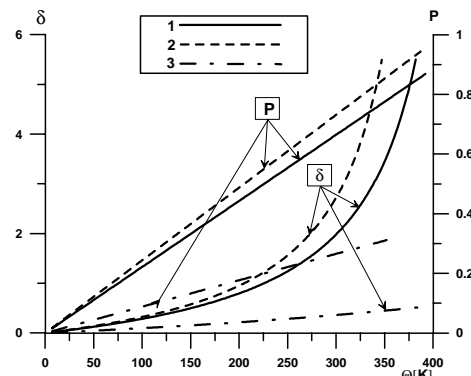
Rys. 11. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,5$  m/s i  $p = 0,4$  MPa  
Fig. 11. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,5$  m/s and  $p = 0,4$  MPa



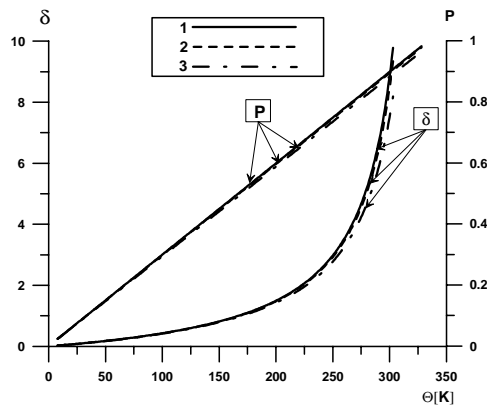
Rys. 12. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 0,5$  m/s i  $p = 1,2$  MPa  
Fig. 12. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 0,5$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



Rys. 13. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 1$  m/s i  $p = 0,4$  MPa  
Fig. 13. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 1$  m/s and  $p = 0,4$  MPa

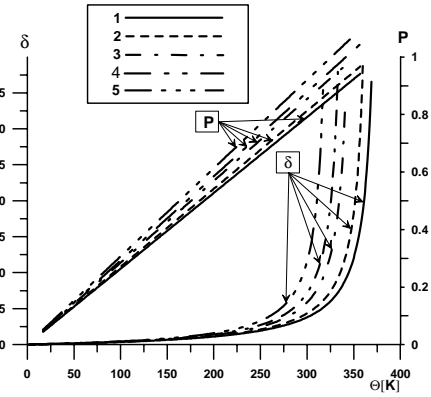


Rys. 14. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla systemów scharakteryzowanych przez współczynnik tarcia  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  i  $\mu = 0,5(3)$  dla parametrów tarcia  $v = 1$  m/s i  $p = 1,2$  MPa  
Fig. 14. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for systems characterized by friction factor  $\mu = 0,3(1)$ ,  $\mu = 0,4(2)$  and  $\mu = 0,5(3)$  to friction parameter  $v = 1$  m/s and  $p = 1,2$  MPa



Rys. 15. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla przypadku tarcia stopów żelaza: 1 – żelazo armco, 2 – stal gat. 45, 3 – stal gat. N8E (według danych z tabeli 2)

Fig. 15. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for case of friction the alloys of iron: 1 – iron armco, 2 – steel 45, 3 – steel N8E (according to data from table 2)



Rys. 16. Zależność prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla przypadku tarcia stopów nieżelaznych: 1 – miedź, 2 – glin, 3 – cynk, 4 – ołów, 5 – stop LC60 (według danych z tabeli 2)

Fig. 16. Temperature  $\Theta$  dependence of probability  $P$  and quotient  $\delta$  for case of friction the alloys of non – ferrous alloys: 1 – copper, 2 – aluminium, 3 – zinc, 4 – lead, 5 – alloy LC60 (according to data from table 2)

Na rysunkach 9–16 zilustrowano zależności prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$  od temperatury  $\Theta$  dla przypadku scharakteryzowanych powyżej systemów tribologicznych.

#### 4. Wnioski

W pierwszej części pracy [4] zaprezentowany został oryginalny model termodynamiczny tarcia ustabilizowanego, który umożliwił głębsze poznanie tego procesu. Wprowadzono do niego dwie nowe stałe kompleksowe, systemowe  $C$  i  $D$ , których sens fizyczny został zinterpretowany.

W niniejszym opracowaniu zastosowano uproszczoną wersję modelu ze stałymi  $C$  i  $D$  oraz wyniki badań tribologicznych pracy właściwej zużycia z pomiarem temperatury [1, 2, 3] do uzyskania częściowego opisu badanych systemów. Otrzymano charakterystyki: intensywności zużycia  $J$ , pracy właściwej zużycia  $e_R^x$ , prawdopodobieństwa powstania strumienia masy produktów zużycia tribologicznego  $P$  i stosunku mas  $\delta$  w funkcji temperatury.

Przedstawiono częściowy opis ilościowy systemów tribologicznych. Uwzględniając pierwszą część opisu ilościowego (rys. 1–8) z wyjątkiem przypadku zilustrowanego na rys. 4 stwierdzono prawidłowość, polegającą na

zwiększaniu się intensywności zużywania i maleniu pracy właściwej zużycia ze wzrostem współczynnika tarcia. Z kolei badania W. Żurowskiego [2, 3] ujawniają zależność intensywności zużywania i pracy właściwej zużycia od struktury stopu żelaza (przy zachowaniu niemal jednakowego współczynnika tarcia). Najbardziej odporny na zużywanie jest perlit, następnie ferryt, a najmniejszą odporność wykazuje struktura mieszana – ferrytyczno-perlityczna.

Z rysunku 8 wynika, że metale nieżelazne: miedź, glin i cynk wykazują zbliżoną do siebie odporność na zużywanie (przy zbliżonych do siebie wartościach współczynnika tarcia). Odporność ta dla metali bardzo miękkich – ołowiu i stopu LC60 (przy zbliżonej do siebie twardości) jest znacznie mniejsza, przy czym dodatek cyny do ołowiu poprawił własności przeciwzużyciowe otrzymanego stopu w odniesieniu do ołowiu.

Ponadto stwierdza się na podstawie badań J. Ciecieląga [1], że w przypadku tarcia stali gat. 45 większym współczynnikiem tarcia odpowiadają większe wartości prawdopodobieństwa  $P$  i stosunku  $\delta$ . Podobnie, przy niemal tych samych wartościach współczynnika tarcia, zauważa się niemal takie same wartości  $P$  i  $\delta$  jak w przypadku tarcia stopów żelaza – rys. 15 według badań J. Sadowskiego i W. Żurowskiego [3]. Natomiast temperaturowe zależności  $P$  i  $\delta$  są do siebie bardzo zbliżone – rys. 16.

Opisy różnych systemów tribologicznych, na podstawie ustalonych stałych  $C$  i  $D$ , uzyskano dla szeregu wyników badań eksperymentalnych bez użycia kalorymetru. Wykazano w ten sposób nowe możliwości charakteryzowania tych systemów, sprzyjające zwiększeniu porównywalności i powtarzalności badań tribologicznych. Szczególna rola przypada tu nowym wielkościom fizycznym  $C$  i  $D$ . Uwzględniają one pośrednio elementarne stałe systemowe:  $c_p$ ,  $a_{dys}$  i  $\Theta_o$ . Przez wprowadzenie stałych  $C$  i  $D$  do zaproponowanego modelu upraszcza się opis systemu tribologicznego i ułatwia jego badanie eksperymentalne.

Opracowane charakterystyki mają znaczenie zarówno poznawcze, jak i użytkowe (jako źródło wytycznych przy projektowaniu eksperymentu tribologicznego dla poprawienia powtarzalności i odtwarzalności badań tarcia i zużywania).

Dzięki wykorzystaniu modelu termodynamicznego [4, 5] możliwe jest bardziej jednoznaczne zdefiniowanie warunków eksperymentów tribologicznych, czego efektem jest znacząca poprawa powtarzalności, a zwłaszcza odtwarzalności wyników.

Specjalnie zaprogramowane badania [10] uwzględniające równoległe strukturę bilansu energetycznego i odporność na zużywanie tribologiczne są przydatne do opracowania pełnego, ilościowego opisu tarcia zaprezentowanego w pracy [4]. W tym zakresie literatura przedmiotu oferuje niezwykle skromne dane, ponieważ dotyczą one bardzo skomplikowanych badań kalorymetrycznych.

*Praca wpłynęła do Redakcji 24.04.2007 r.*

## Literatura

- [1] Ciecieląg J.: Energetyczne uwarunkowania odporności metali na zużywanie tribologiczne. Rozprawa doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1994.
- [2] Żurowski W.: Energetyczny aspekt wzrostu odporności metali na zużywanie w procesie tarcia technicznie suchego. Rozprawa doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1996.
- [3] Sadowski J., Żurowski W.: Thermodynamische Aspekte über die Verschleißbeständigkeit von Metallen. Tribologie und Schmierungstechnik 1992, Nr 3, S. 152–159.
- [4] Maciąg M.: Analiza termodynamiczna cech systemu tribologicznego na przykładach wybranych badań eksperymentalnych. ZEM 4/2006.
- [5] Maciąg M.: Model termodynamiczny ustabilizowanego tarcia i zużywania metali. Rozprawa doktorska. Politechnika Radomska, Radom 2005.
- [6] Maciąg M.: Model termodynamiczny procesu tarcia i zużywania ustabilizowanego. Tribologia 2006, nr 2.
- [7] Maciąg M.: Stałe kompleksowe charakteryzujące system tribologiczny. Tribologia 2006, nr 5.
- [8] Maciąg M.: Model termodynamiczny zużywania ściernego metali. Tribologia 2003, nr 1.
- [9] Volk W.: Statystyka stosowana dla inżynierów. WNT, Warszawa 1965.
- [10] Sarnowicz L.: Analiza procesu tarcia metali na podstawie badań kalorymetrycznych. Rozprawa doktorska. Politechnika Świętokrzyska, Kielce 1999.

## Thermodynamic analysis of tribological system properties, part II

### Summary

In second part of the work, there have been taken advantage of experimental, standard results of friction and wear [1, 2, 3] for quantitative description of chosen tribologic systems on the basis of thermodynamical model, which has been introduced in first part of work [4]. System complex constants  $C$  and  $D$  have been presented and compiled together with their way of determination. Then, it has been assigned: specific work of wear, wear severity, probability of flux of mass of tribologic wear products formation, relation between used up mass and mass, which was brought up to flash temperature as the temperature functions. At the end, meaning and advantages of definition of tribologic system have been explained with the help of system complex constants  $C$  and  $D$ . On the basis of received profiles, the conclusions concerning the course of phenomena proceeding in the frictional contact of two bodies have been also presented.

