

Tomasz ROCHATKA\*, Wiesław ZWIERZYCKI<sup>1</sup>

## ROZWINIĘCIA IDEI M.M. CHRUSČOVA WERSJA WSPÓŁCZESNA

### THE CONTEMPORARY VERSION OF THE CONTINUATION OF KRUSHCHEV'S CONCEPT

#### Słowa kluczowe:

zużycie, badania, charakterystyki zużyciowe

#### Key words:

wear, testing, characteristics

#### Streszczenie

W przedstawionych w artykule badaniach autorzy wykorzystali koncepcję M.M. Chruščova wyznaczania liniowej intensywności zużywania  $I_h$  w układach modelowych pracujących pod stałym obciążeniem, w których w wyniku zużycia maleją naprężenia stykowe. Opracowano model matematyczny wiążący pionowe zbliżenie próbek w aparacie czterokulowym wyposażonym w węzeł 3 wałeczki – stożek z wymiarem śladu zużycia wałeczków.

---

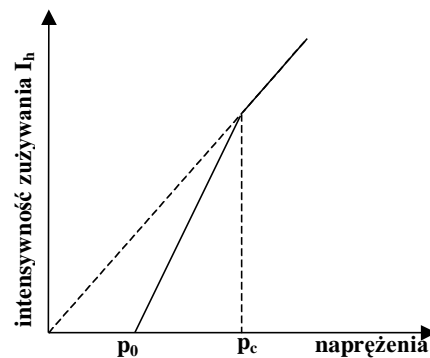
<sup>1</sup> Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych Politechniki Poznańskiej  
ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

Model zweryfikowano w specjalnym eksperymencie uzyskując bardzo dobrą zbieżność wyników obliczeń i eksperymentu.

## WPROWADZENIE

W artykule opublikowanym w roku 1990 I.A. Bujanovski [L. 1] przypomniał badania M.M. Chruščova [L. 2], w których o odporności na zużywanie materiałów wnioskowano na podstawie rozmiaru śladu zużycia próbki płaskiej za pomocą obracającego się wału lub tarczy, przy stałym obciążeniu. Wyniki swych badań M.M. Chruščov przedstawił w postaci zależności liniowej intensywności zużywania  $I_h$  (zużycie liniowe  $h$  odniesione do drogi tarcia  $s$ ) od malejących naprężeń stykowych  $p$  (Rys.1). Na charakterystyce z Rys. 1. można wyróżnić trzy zakresy:

- w pierwszym naprężenia stykowe maleją od naprężenia hertzowskiego  $p_H$  do wartości  $p_c$  – w tym okresie następuje docieranie współpracujących elementów (tarcie graniczne),
- w drugim obszarze współpracy (zmiana naprężenia od wartości  $p_c$  do  $p_0$ ) zwiększa się dalej powierzchnia styku i liniowo maleje intensywność zużywania  $I_h$ , tarcie ma charakter mieszany (półpłynny) a zużywanie przebiega w sposób ustabilizowany;
- po osiągnięciu w teście zużyciowym naprężeń stykowych po zużywanie praktycznie nie jest zauważalne, w przypadku smarowania elementów olejem można sądzić, że zachodzi tarcie płynne, w przypadku zaś stosowania smarów z aktywnymi powierzchniowo substancjami można się „doszukiwać” efektu mechano - chemicznego (równowaga zużywania i odbudowy warstewek powierzchniowych).



Rys. 1. Intensywność zużywania  $I_h$  w funkcji naprężeń stykowych [L. 1]

Fig. 1. Wear rate  $I_h$  versus normal contact stress  $p$  [L. 1]

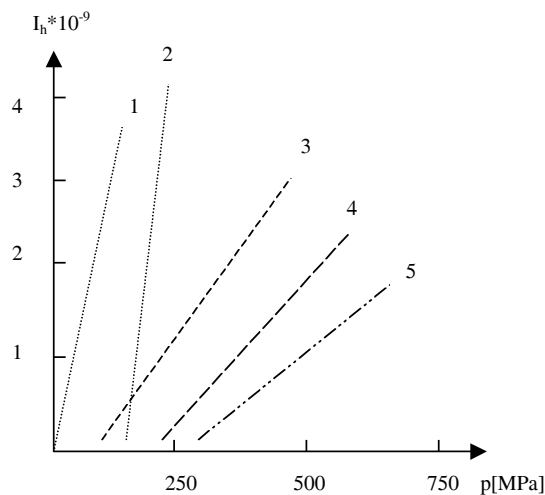
Scharakteryzowaną wyżej ideę M.M. Chruščova zastosował I.A. Bujanovski [L. 1] do badania dodatków przeciwzużyciowych i przeciwzatarciowych na aparacie czterokulowym w różnych kompozycjach olejowych. Testy zużyciowe prowadzone były w próbach piętnastominutowych, po których mierzono średnice śladów wytarcia kulek  $d$ , a zużycie liniowe  $h$  określono z równania Fenga [L. 3].

$$h = (39,4d^2 - 2,732 \cdot 10^{-3}N/d) \cdot 10^{-9} \quad (1)$$

w którym uwzględniono efekt sprężystego i odkształcenia ( $N$  – siła osiowa obciążająca układ tarcia). W eksperymencie stosowano typowe kulki ze stali ŁH15 o średnicy 12,7 mm. Po każdym piętnastu minutach próbę przerywano, mierząc średnicę śladu zużycia  $d$  wykorzystywaną do obliczenia  $h$  oraz  $p$ . Liniową intensywność zużywania obliczano z zależności

$$I_h = \frac{dh}{dS} \approx \frac{h_1 - h_2}{S_1 - S_2} = \frac{\Delta h}{\Delta S} \quad (2)$$

Rezultaty badań I.A. Bujanovskiego potwierdzające słuszność idei M.M. Chruščova pokazano na **Rys. 2**.



**Rys. 2.** Intensywność zużywania stali ŁH15 w funkcji naprężeń stykowych (1–5 różne środki smarowe) [L. 1]

**Fig. 2.** Wear rate of ŁH15 steel versus normal contact stress (1–5 different lubricants) [L. 1]

## DALSZY ROZWÓJ PODEJŚCIA

Autorzy tego artykułu wykorzystali scharakteryzowane wcześniej podejścia do rozwiązywania własnego problemu badawczego, jakim był racjonalny dobór materiałów konstrukcyjnych współpracujących tarciovo w środowiskach technologicznych przemysłu spożywczego. Dyrektywy UE w związku z koniecznością zapewnienia wysokiego poziomu higieny przy produkcji dopuszczają do styku z żywnością w grupie materiałów metalicznych jedynie:

- stale odporne na korozję,
- aluminium anodowane oraz
- powłoki cynowe (blachy na puszki do konserw).

Zabronione jest obecnie stosowanie stopów miedzi.

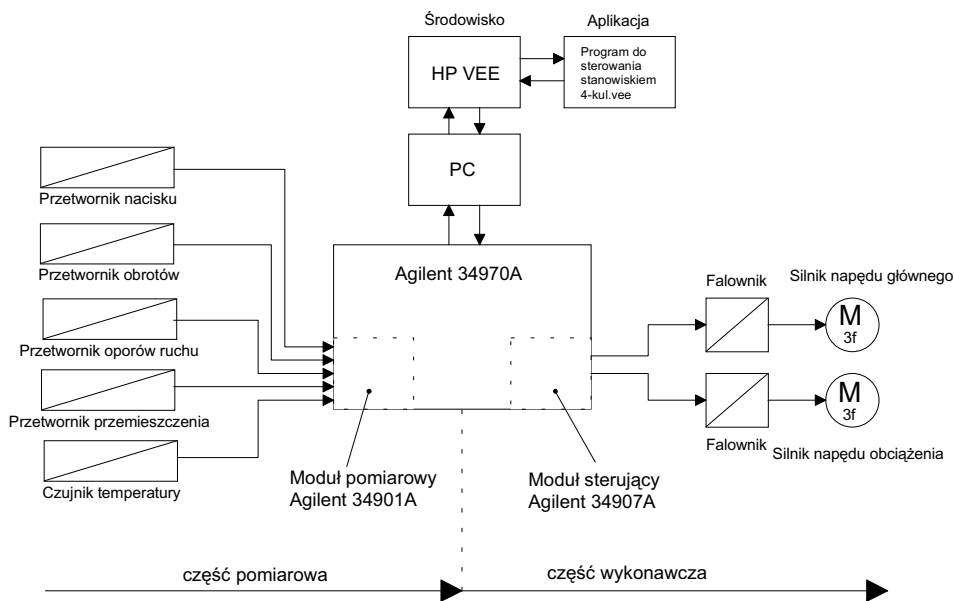
Znana powszechnie jest opinia, że stale odporne na korozję, a więc stale chromowe i chromowo-niklowe cechują się znacznie gorszymi własnościami tribotechnicznymi niż stale węglowe, jednak dane o tych własnościach są nieliczne i w związku z tym nie można ich wykorzystać przy projektowaniu elementów (i powierzchni) roboczych maszyn technologicznych dla przemysłu spożywczego. Istniała zatem konieczność opracowania metody pozwalającej uzyskiwać charakterystyki zużyciowe przydatne w projektowaniu, dla rzeczywistych materiałów konstrukcyjnych współpracujących tarciovo w rzeczywistych środowiskach technologicznych.

Poszukując rozwiązania tego problemu [L. 7] przyjęto, że tworzenie baz danych jest wtedy racjonalne, gdy testy zużyciowe prowadzone będą na urządzeniu szeroko rozpowszechnionym w laboratoriach badawczych. Metoda musi pozwalać również na wyznaczenie liniowej intensywności zużywania  $I_h$  w funkcji naprężeń stykowych  $p$ . Taka bowiem charakterystyka, uniwersalna pozwala dokonywać obliczeń trwałości (niezawodności) przy pomocy wcześniej opracowanych programów komputerowych [L. 9, 10]. Działania autorów zmierzające do rozwiązania postawionego problemu przebiegały następująco [L. 7]:

1. Analiza innych prac związanych z wyznaczaniem liniowej intensywności zużywania  $I_h$  na aparacie czterokulowym [L. 4–6], przyniosła przekonanie, że konieczne jest wyposażenie tribometru w układ mierzący precyzyjnie zbliżenie próbek w wyniku zużycia. A. Bos [L. 4] wyprowadził uproszczoną zależność funkcyjną wiążącą mierzone zbliżenie pionowe ze średnicą skaz kulek dolnych. Dokładniejsze rozwiązania są autorstwa G.A. Strunksa, D.K. Totha, C.S. Saby [L. 5, 6]

2. Zdecydowano się na wybór aparatu czterokulowego ze skojarzeniem trzy wałeczki – stożek, taki układ jest znacznie wygodniejszy (tańszy) w przypadku konieczności odwzorowywania w badaniach triady materiałowej: „materiał elementu 1 – środowisko – materiał elementu 2”.
3. Tribometr wyprodukowany w Instytucie Technologii Eksploatacji poddano gruntownej modernizacji obejmującej:
  - a) zmiany w układach wykonawczych,
  - b) opracowanie systemu automatycznego sterowania częścią wykonawczą i pomiarową,
  - c) realizację układu mierzącego pionowe zbliżenie próbek.

W rezultacie uzyskano urządzenie pozwalające na ciągłą regulację obciążeń i prędkości ślizgania oraz gradientów zmian tych. Schemat układów i wzajemne powiązania między ich elementami pokazano na **Rys. 3**.



**Rys. 3. Schemat powiązań między układami tribometru [L. 7]**

Fig. 3. The scheme of the connections between blocks of tribometer [L. 7]

4. Opracowano zależność funkcjonalną wiążącą pionowe zbliżenie w układzie „3w-s” z wymiarem śladu zużycia wałeczków. Punktem wyjścia do uzyskania własnego rozwiązania były przesłanki wynikające z pracy G.A. Strunksa, D.K. Totha, C.S. Saby (rozwiązane dla układu czterech kulek [L. 5]):

- pionowe przemieszczenie współpracujących elementów zależne jest od szerokości skazy zużycia zmierzonej w kierunku prostopadłym do kierunku ruchu,
  - długość skazy (zmierzona w kierunku równoległym do kierunku ruchu) determinowana jest kształtem skazy (promieniem krzywizny) w przekroju prostopadłym; wspomniany promień krzywizny skazy zależy od wartości zużycia ruchomego elementu,
  - przekrój skazy w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku ruchu ma kształt kołowy.
5. Zaproponowany w pracy [L. 5] model można zastosować, gdy udział zużycia w pionowym przemieszczeniu kulek znacznie przewyższa układ odkształceń sprężystych.

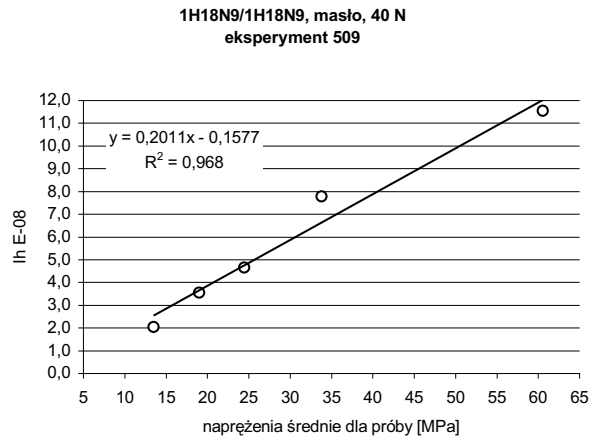
Przeprowadzono specjalnie zaplanowany eksperyment weryfikujący opracowany model autorski dla skojarzeń ze stali 45, 1H18N9 i H17 w oleju uniwersalnym bez dodatków oraz w przykładowych środowiskach spożywczych jak masło i margaryna [L. 7]. Przykładowe wyniki badań jednoimiennego skojarzenia ze stali 1H18N9 w maśle jako środowisku technologicznym przedstawiono w **Tab. 1** oraz na **Rys. 4 i 5**. Widać zadowalającą (bardzo dobrą) zbieżność między wynikami pomiarów oraz obliczeń

**Tabela 1. Wyniki testów dla skojarzeń 1H18N9/1H18N9 w maśle [L. 7]**

Teb. 1. The results of the test for 1H18N9/1H18N9 in the butter as lubricant [L. 7]

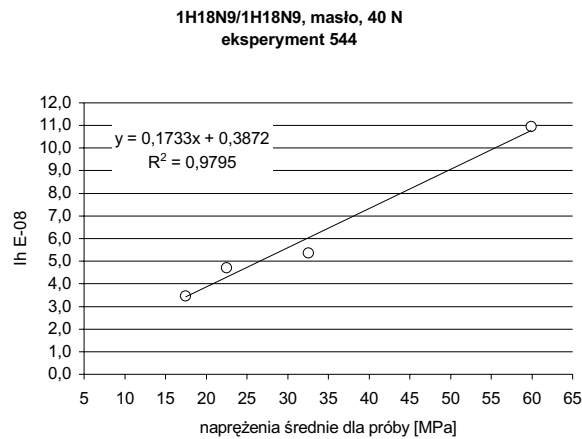
Lp	przedział czasu	zmiana rezystancji	średnice skaz		naprężenia	intensyw. zużycia E-08	WARUNKI BADAŃ		
			pomiar	obliczenia			temp. środka smarowego	moment tarcia	siła osiowa
	[s]	[Ω]	[mm]	[mm]	[MPa]	[-]	[°C]	[Nm]	[N]
badanie 509									
1	1080	13,58	0,90 / 0,67	0,90 / 0,65	–	–	40,15	0,0362	24,24
2	590	25,96	1,20 / 0,90	1,20 / 0,90	60,54	11,55	35,95	0,0242	23,76
3	780	36,58	1,43 / 1,07	1,41 / 1,07	33,79	7,8	37,15	0,0233	23,82
4	1400	53,46	1,63 / 1,30	1,61 / 1,29	24,41	4,66	36,53	0,0292	24
5	720	60,02	1,67 / 1,37	1,69 / 1,37	18,98	3,55	35,32	0,0249	24,03
6	6075	88,16	1,93 / 1,60	2,00 / 1,66	13,49	2,06	28,57	0,0255	24,97
badanie 544									
1	870	13,12	0,90 / 0,67	0,88 / 0,64	–	–	38,59	0,0255	26,05
2	630	25,56	1,20 / 0,90	1,19 / 0,90	59,93	10,96	36,23	0,0215	25,84
3	1300	37,62	1,43 / 1,07	1,43 / 1,09	32,58	5,36	35,49	0,0177	25,76
4	1400	54,76	1,63 / 1,30	1,63 / 1,31	22,51	4,72	34,64	0,0197	26,22
5	1100	63,74	1,67 / 1,37	1,74 / 1,41	17,43	3,46	33,27	0,0175	26,37

średnic skaz zużycia (**Tab. 1** – czwarta i piąta kolumna) oraz liniowy charakter zależności intensywności zużywania  $I_h$  od naprężeń stykowych (**Rys. 4 i 5**).



**Rys. 4. Intensywność zużywania  $I_h$  w funkcji naprężeń stykowych p (eksperyment 509, czas – 3h) [L. 7]**

Fig. 4. Wear rate  $I_h$  versus normal contact stress p (test number 509, time of test – 3h) [L. 7]



**Rys. 5. Intensywność zużywania  $I_h$  w funkcji naprężeń stykowych p (eksperyment 503, czas – 1,5h) [L. 7]**

Fig. 5. Wear rate  $I_h$  versus normal contact stress p (test number 503, time of test - 1,5h) [L. 7]

## PODSUMOWANIE

Przedstawiony w artykule fragment wyników badań wskazuje na możliwości nowo opracowanej metody. Wariant, w którym w aparacie czterokulowym wykorzystuje się węzeł tarcia 3 wałeczki – stożek pozwala w sposób względnie tani, odwzorować rzeczywisty styk tarciowy materiałów konstrukcyjnych w środowiskach ciekłych i mazistych. Opracowana metoda ma charakter uniwersalny, lecz szczególnie przydatna jest w przypadku badań w środowiskach przemysłu spożywczego, które cechuje tak duża złożoność, że nie jest celowe zastępowanie ich środowiskami modelowymi (uproszczonymi). Metoda jest szybka (bezdemontażowa), obliczenia wykonuje na bieżąco program komputerowy sterujący procesem badawczym, dlatego celowe jest jej stosowanie nie tylko do tworzenia baz danych, lecz również do optymalnego doboru materiałów w konkretnym przypadku projektowym. Opracowany system pomiarowy jest kompatybilny z opracowanym wcześniej systemem komputerowym umożliwiającym wszechstronną analizę trwałościowo-niezawodnościową węzłów podlegających zużyciu [L. 8–10].

## LITERATURA

1. N.A. Вujanовский, Развитие идеи М.М. Хрущова о триботехнических испытаниях материалов, *Trenie i Iznos*, 1990, nr 6, s. 1124–1132.
2. Жрущов М.М.: Исследования прибором силавов и цанф М.Л. 1946.
3. Feng I. Ming, A new approach in interpreting the four-ball wear results. *Wear*, vol. 5, 1962, s. 275–288.
4. Bos A., Wear in the four-ball apparatus: relationship between the displacement of the upper ball nad the diameter of the wear scars on the lower balls. *Wear*, vol. 41, 1977, s. 191–194.
5. Strunks G.A., Toth D.K., Saba C.S., Geometry of wear in the sliding four-ball wear test. *Tribology Transactions*, vol. 35, 1992, s. 715–723.
6. Wright M.S., Jain V.K., Saba C.S., Wear rate calculation in the four-ball wear test. *Wear*, vol. 134, 1989, s. 321–324.
7. Rochatka T. Tribotechniczna ocena stali odpornych na korozję. Rozprawa doktorska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej (maszynopis – przewód w toku), Poznań 2003.
8. Stachowiak A. Rozprawa doktorska nt. „Kształtowanie niezawodności kinematycznych węzłów maszyn podlegających zużyciu korozyjno-mechanicznym”, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu Politechniki Poznańskiej Poznań 2002.



9. Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujące tarciovo. Pod. red. W. Zwierzyckiego i M. Grądkowskiego. Wyd. ITeE, Radom–Poznań, 2001.
10. Modele prognostyczne korozyjno-mechanicznego zużywania się elementów maszyn. Pod. red. W. Zwierzyckiego. Wyd. ITeE, Poznań–Radom 2002.

**Recenzent:**  
**Jan BURCAN**

#### Summary

**The authors of this paper have elaborated the new method of measuring the value of the wear rate  $I_h$  as the function of the normal contact stress  $p$ . In order to achieve this aim a four-ball apparatus with the system „three rollers – cone” was used. A new solution adopts the old M.M. Krushchev’s concept connected with the wear test, in which normal contact stress  $p$  is decreasing during the test time (the normal force is constant). The results of experiments verifying elaborated model are presented as well.**