

Andrzej DZIERWA

## OKREŚLENIE INTENSYWNOŚCI ZUŻYCIA NA PRZYKŁADZIE ELEMENTÓW STALOWYCH

### Streszczenie

Badania tribologiczne zostały przeprowadzone przy użyciu testera kulka-tarcza. Materiał tarczy stanowiły próbki wykonane ze stali 42CrMo4 ulepszone cieplnie do twardości  $40 \pm 2$  HRC. Materiał kulki o średnicy 6,35 mm stanowiła stal 100Cr6 o twardości 62 HRC. Obróbką wykańczającą tarcz stalowych było szlifowanie (1 wariant) oraz piaskowanie (2 wariant). Dzięki temu uzyskano różne wartości średniego arytmetycznego odchylenia nierówności powierzchni  $S_a$  - w przypadku powierzchni szlifowanej  $S_a = 0,227 \mu\text{m}$ , a w przypadku powierzchni piaskowanej  $S_a = 3,49 \mu\text{m}$ . Powierzchnia szlifowana była powierzchnią anizotropową ( $Str=0,0426$ ), natomiast powierzchnia piaskowana – izotropową ( $Str=0,815$ ). Obciążenie podczas badań tribologicznych wyniosło 10N. Testy wykonano przy średnicy tarczy  $d=10$  mm, stosując identyczną prędkość obrotową  $n=300$  obr/min. Prędkość ślizgowa  $v$  wyniosła 0,157 m/s. Całkowity czas badań intensywności zużycia wyniósł 1 godz. Jednak każdorazowo po kolejnych 15 minutach testu, tester był zatrzymywany i określano zużycie badanej powierzchni. Wielkość zużycia określono przy pomocy profilometru optycznego Talysurf CCI Lite. Po zeskanowaniu powierzchni, generowano profile w kierunku prostopadłym do śladów zużycia, dzięki czemu możliwym było wyznaczenie pola powierzchni zużycia badanych tarcz. W trakcie badań rejestrowano także siłę tarcia. W trakcie testów produkty zużycia znajdujące się komorze testera, a pojawiające się wskutek współpracy elementów były usuwane na bieżąco przy pomocy sprężonego powietrza. Wszystkie testy przeprowadzono z trzykrotną powtarzalnością.

### WSTĘP

W rozwoju gospodarczym ważne funkcje spełniają systemy transportowe a wśród nich transport szynowy umożliwiający przemieszczanie ludzi oraz towarów. Budowane nowoczesne linie kolejowe dla pojazdów szynowych a drogom kolejowym stawiane są wysokie wymagania w zakresie bezpieczeństwa. Kształtownicy, z których budowane są tory szynowe i rozjazdy kolejowe muszą spełniać wysokie kryteria pod względem wymagań w zakresie właściwości materiału, kształtu i ciągłości materiału w całej objętości. Drogi kolejowe składają się m.in. z torów szynowych i rozjazdów kolejowych. Te ostatnie stanowią złożoną konstrukcję odcinków dróg kolejowych, rozwidlają lub łączą krzyżujące się tory. Są one narażone w sposób szczególnie na zużycie ściernie, zmęczeniowe i zmiany kształtu w wyniku oddziaływania dużych obciążeń dynamicznych o cyklicznym charakterze, które występują podczas przejazdu pojazdów szynowych przez rozjazd [1,2].

Ogólnie zmiany, jakie zachodzą w warstwie wierzchniej podczas procesów tarcia i zużycia ciernego można podzielić na trzy rodzaje [3]:

- zmiany odwracalne (zmiany znikające po usunięciu oddziaływania zewnętrznego, jakie je wywołują np. odkształcenie sprężyste nierówności) i zmiany trwałe (zmiany, które pozostają po usunięciu oddziaływań, jakie je powodują np. odkształcenie plastyczne nierówności),
- zmiany doraźne (zmiany zachodzące w trakcie jednokrotnego styku nierówności, które nie rozwijają się podczas następnych oddziaływań o jednakowym charakterze, np. ścięcie nierówności) i zmiany narastające (zmiany, które rozwijają się pod wpływem powtarzających się j oddziaływań zewnętrznych o tym samym charakterze. Najczęściej rozwój zmiany narastającej prowadzi do zapoczątkowania rozwoju innej zmiany np. narastanie zmian będących wynikiem powtarzających się odkształceń prowadzi do pęknięcia zmęczeniowego materiału),

- zmiany płytkie (zmiany nieprzekraczające głębokości kilku mikronów) i głębokie.

Ponieważ zużywanie w większości przypadków prowadzi do zmniejszenia funkcjonalności, trwałości maszyn i ich elementów powinno się mu przeciwdziałać. Ma to na celu wyeliminowanie lub sprowadzenie do minimum skutków zużycia. Przeciwdziałanie powinno zacząć się już na etapie konstruowania, należy wtedy dobrać takie formy zespołu tribomechanicznego, materiały i smarowanie, aby zminimalizować zużycie w trakcie eksploatacji. Oprócz konstrukcyjnego zapobiegania zużyciu istnieje także technologiczny sposób przeciwdziałania jemu, osiągany za pomocą [4,5]:

- obróbki cieplnej (hartowanie powierzchniowe),
- obróbki cieplno-chemicznej (np. azotowanie utwardzające, nawęglanie, cyjanowanie, chromowanie dyfuzyjne),
- obróbki plastycznej (np. młotkowanie, dogniatanie),
- pokryć i powłok (np. niklowanie chemiczne, napawanie, fosforowanie).

Biorąc pod uwagę poziom hierarchiczny struktury, rozróżnić można niszczenie trących się elementów, które zachodzi w strefie przypowierzchniowej oraz w objętości, istnieje także drugi podział na mikrozużywanie i makrozużywanie. Z uwagi na rodzaj ruchu – ślizganie, uder, oscylacja, toczenie, a biorąc pod uwagę rodzaj tarcia – tarcie w obecności środka smarnego, ścierniwa lub jego brak. Uwzględniając charakter wzajemnego oddziaływania skojarzonych powierzchni spotkać się można z podziałem na oddziaływanie mechaniczne oraz oddziaływanie adhezyjne. Dla zużywania mechanicznego z kolei można wyróżnić zużywanie w wyniku zmęczenia tarcowego (dla styku sprężystego), zużywanie w wyniku bruzdowania i niskocyklowego zmęczenia tarcowego (dla styku plastycznego) i mikroskrawanie. W przypadku oddziaływania adhezyjnego może wystąpić głębokie wyrwanie bądź naruszenie więzi tarcowej [6,7].

Celem niniejszej pracy było określenie intensywności oraz porównanie zużycia próbek wykonanych ze stali 42CrMo4, gdzie

obróbką wykańczającą stanowiło w pierwszym przypadku piaskowanie natomiast w drugim szlifowanie w warunkach tarcia suchego.

## 1. METODYKA BADAŃ

Badania zostały przeprowadzone przy użyciu testera tribologicznego kulka/trzpień – tarcza T-11 (rys. 1). Materiał tarczy stanowiły próbki wykonane ze stali 41Cr4 ulepszone cieplnie do twardości  $40 \pm 2$  HRC. Materiał trzpienia o średnicy  $d=3$  mm stanowiła stal 100Cr6 o twardości 62 HRC. Obróbką wykańczającą tarcz było szlifowanie oraz piaskowanie, dzięki czemu uzyskano struktury geometryczne zasadniczo różniące się względem siebie. Obciążenie podczas badań tribologicznych wyniosło 10 N, natomiast prędkość obrotowa  $n=300$  obr/min. Średnica tarcia wynosiła 10 mm, w związku z czym prędkość ślizgowa była równa  $v=0,157$  m/s. Intensywność zużycia badano poprzez zatrzymywanie testera każdorazowo po 15, 30, 45 i 60 minutach testu dokonując pomiaru zużytej powierzchni, w tym samym miejscu przy użyciu profilometru optycznego Talysurf CCI Lite. Po zeskanowaniu powierzchni, generowano profile w kierunku prostopadłym do śladów zużycia, dzięki czemu możliwym było wyznaczenie pola powierzchni zużycia badanych tarcz. W trakcie testów produkty zużycia znajdujące się komorze

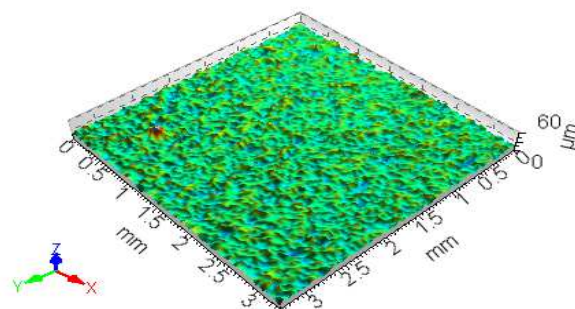


Rys. 1. Tester tribologiczny T-11

testera, a pojawiające się wskutek współpracy elementów były usuwane na bieżąco przy pomocy sprężonego powietrza. Wszystkie testy przeprowadzono z trzykrotną powtarzalnością. Widoki izometryczne powierzchni przed badaniami przedstawiono na rys. 2-3. Na rysunku tym zaprezentowano również następujące wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni [8]:

Sa – średnie arytmetyczne odchylenie nierówności powierzchni,  
 Sq – średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia,  
 Ssk – współczynnik symetrii powierzchni,  
 Sku – współczynnik nachylenia powierzchni,  
 Sp – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni,  
 Sv – głębokość najniższego wgłębienia powierzchni,  
 Sz – wysokość nierówności powierzchni dla 10 punktów,  
 Sa – długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji,  
 Str – wskaźnik tekstury powierzchni,  
 Std – kierunek tekstury powierzchni główny,  
 Spd – gęstość wierzchołków powierzchni między dwoma płaszczyznami tnącymi,  
 Spc – średnie arytmetyczne pochylenie nierówności powierzchni (mierzone w kierunku maksymalnego spadku każdego pojedynczego elementu powierzchni),  
 S10z – średnia wysokość pięciu najwyższych i pięciu najniższych punktów topografii,  
 S5p – wysokość 5-ciu wierzchołków powierzchni,  
 S5v – wysokość 5-ciu wgłębień powierzchni,  
 Sda – średni obszar wgłębień,

Sha – średni obszar wierzchołków,  
 Sdv – średnia objętość wgłębień,  
 Shv – średnia objętość wierzchołków.



Parametry amplitudowe

Sq = 4.6  $\mu$ m  
 Ssk = 0.098  
 Sku = 6.11  
 Sp = 38  $\mu$ m  
 Sv = 24.4  $\mu$ m  
 Sz = 62.3  $\mu$ m  
 Sa = 3.49  $\mu$ m

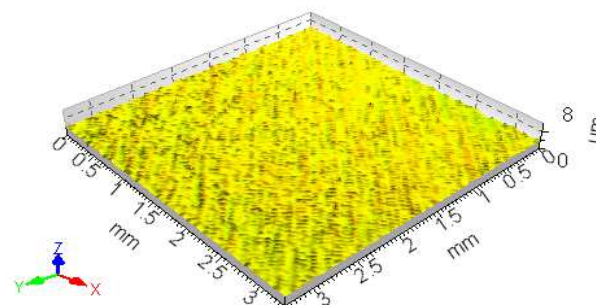
Parametry przestrzenne

Sal = 0.0317 mm  
 Str = 0.815  
 Std = 63.5°

Parametry cech

Spd = 197 1/mm<sup>2</sup>  
 Spc = 0.271 1/mm  
 S10z = 41.9  $\mu$ m  
 S5p = 22  $\mu$ m  
 S5v = 19.8  $\mu$ m  
 Sda = 0.0234 mm<sup>2</sup>  
 Sha = 0.0472 mm<sup>2</sup>  
 Sdv = 1.34e-006 mm<sup>3</sup>  
 Shv = 3.03e-006 mm<sup>3</sup>

Rys. 2. Widok izometryczny powierzchni piaskowanej oraz wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni



Parametry amplitudowe

Sq = 0.294  $\mu$ m  
 Ssk = -0.658  
 Sku = 8.45  
 Sp = 3.63  $\mu$ m  
 Sv = 5.24  $\mu$ m  
 Sz = 8.87  $\mu$ m  
 Sa = 0.227  $\mu$ m

Parametry przestrzenne

Sal = 0.0144 mm  
 Str = 0.0426  
 Std = 138°

Parametry cech

Spd = 289 1/mm<sup>2</sup>  
 Spc = 0.0841 1/mm  
 S10z = 6.19  $\mu$ m  
 S5p = 1.89  $\mu$ m  
 S5v = 4.31  $\mu$ m  
 Sda = 0.0178 mm<sup>2</sup>  
 Sha = 0.0518 mm<sup>2</sup>  
 Sdv = 5.81e-008 mm<sup>3</sup>  
 Shv = 2.07e-007 mm<sup>3</sup>

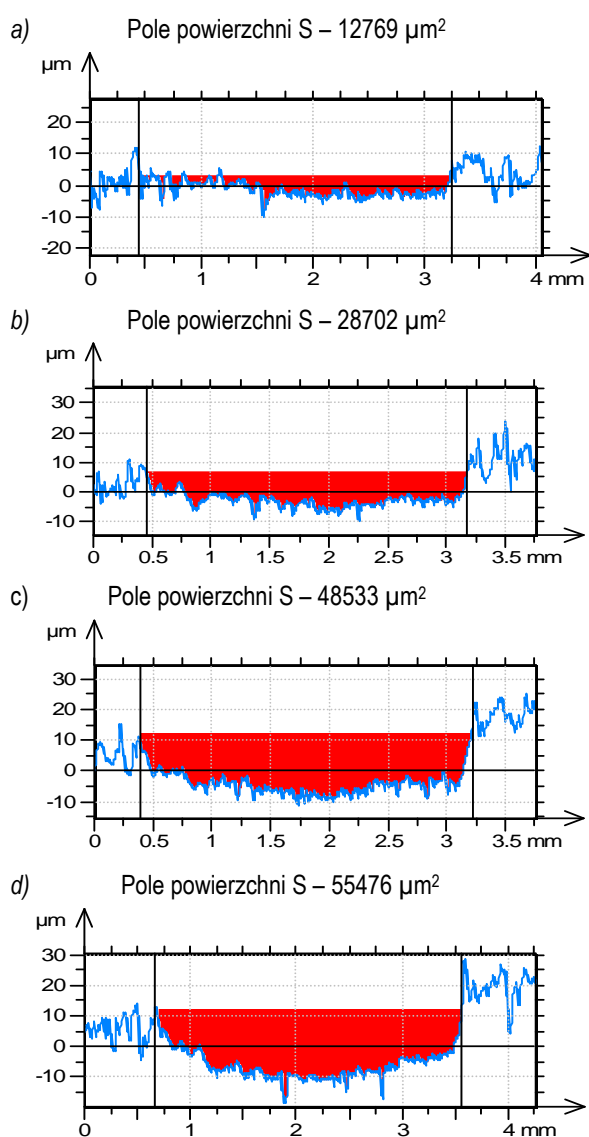
Rys. 3. Widok izometryczny powierzchni szlifowanej oraz wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni

Powierzchnia szlifowana była powierzchnią anizotropową –  $Str=0,0426$  (parametr ten może przyjmować wartości z przedziału 0-1, przy czym wartość zbliżona do zera świadczy o anizotropowości powierzchni, natomiast wartości bliżej 1 o izotropowości powierzchni), o średnim arytmetycznym odchyleniu nierówności powierzchni  $Sa = 0,227 \mu$ m. Z kolei powierzchni piaskowana była typową powierzchnią izotropową ( $Str=0,815$ ) o znacznie wyższej wartości parametru  $Sa = 3,49 \mu$ m.

## 2. OMÓWIENIE WYNIKÓW BADAŃ

Na rysunkach 4-5 zaprezentowano pola zużytych powierzchni piaskowanej i szlifowanej odpowiednio po 15 (a), 30 (b), 45 (c) i 60 (d) minutach pracy. Dodatkowo na rys. 6 zaprezentowano porównanie wielkości intensywności zużycia powierzchni poddanym testom.

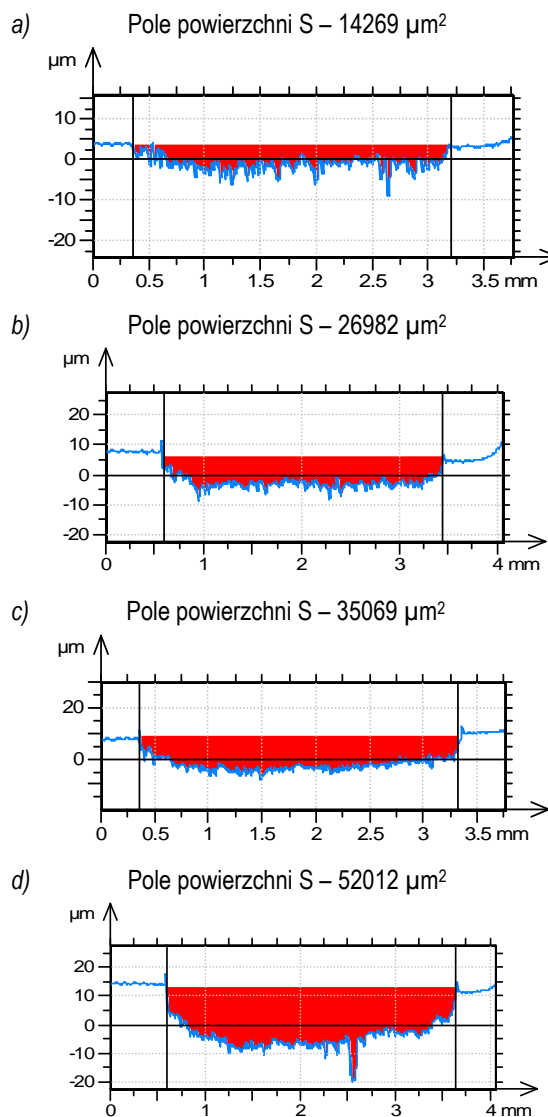
Pole powierzchni zużycia powierzchni szlifowanej po pokonaniu 141,3 m (co odpowiadało 15 min. testu) wyniosło  $14269 \mu\text{m}^2$ . Obliczone na tej podstawie zużycie objętościowe  $V$  wyniosło  $0,448 \text{ mm}^3$ . Po kolejnych 15 minutach zużycie objętościowe wzrosło do  $0,847 \text{ mm}^3$  a więc blisko dwukrotnie. Następnie badania zostały zatrzymane po 45 minutach (co odpowiadało drodze tarcia 423,9 m). W tym przypadku zużycie objętościowe  $V$  wyniosło  $1,101 \text{ mm}^3$  i był to wzrost o 30% w stosunku do wartości uzyskanej po 30 minutach testu. Po przebyciu 565,2 m czyli po pełnej 1 godz. testu, pole powierzchni zużycia próbki szlifowanej wyniosło  $52012 \mu\text{m}^2$  co odpowiadało zużyciu objętościowemu  $V=1,633 \text{ mm}^3$ . Wzrost wielkości zużycia objętościowego w ciągu ostatnich 15 minut testu wyniósł 48%.



**Rys. 4.** Pole powierzchni zużytej piaskowanej po 15 (a), 30 (b), 45 (c) i 60 (d) minutach pracy

Pole powierzchni zużycia powierzchni piaskowanej po pokonaniu 141,3 m (co odpowiadało 15 min. testu) wyniosło  $12769 \mu\text{m}^2$ . Obliczone na tej podstawie zużycie objętościowe  $V$  wyniosło  $0,401$

$\text{mm}^3$ . Po kolejnych 15 minutach zużycie objętościowe wzrosło do  $0,901 \text{ mm}^3$  a więc ponad dwukrotnie. Następnie badania zostały zatrzymane po 45 minutach (co odpowiadało drodze tarcia 423,9 m). W tym przypadku zużycie objętościowe  $V$  wyniosło  $1,524 \text{ mm}^3$  i był to wzrost o 69% w stosunku do wartości uzyskanej po 30 minutach testu. Po przebyciu 565,2 m czyli po pełnej 1 godz. testu, pole powierzchni zużycia próbki szlifowanej wyniosło  $55476 \mu\text{m}^2$  co odpowiadało zużyciu objętościowemu  $V=1,742 \text{ mm}^3$ . Wzrost wielkości zużycia objętościowego w ciągu ostatnich 15 minut testu wyniósł 14%.



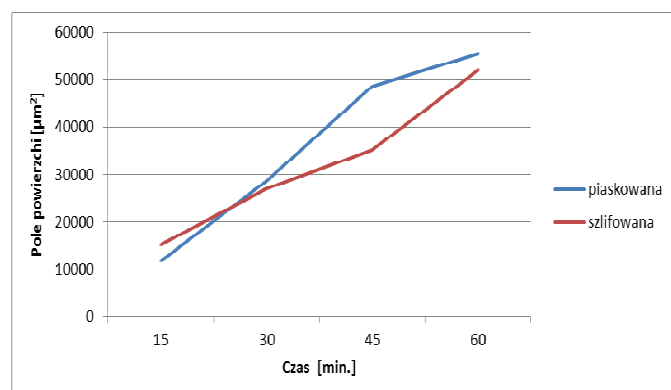
**Rys. 5.** Pole powierzchni zużytej szlifowanej po 15 (a), 30 (b), 45 (c) i 60 (d) minutach pracy

W trakcie testów mierzona była również siła tarcia. W przypadku próbki piaskowanej, w początkowej fazie siła ta wyraźnie rosła osiągając wartość maksymalną  $6,88 \text{ N}$  w 8 minucie. Po tym czasie nastąpiło ustabilizowanie jej wartości na poziomie  $6,6-6,8 \text{ N}$ . W przypadku próbki szlifowanej stwierdzono znacznie krótszy czas niezbędny do uzyskania stabilnych wartości drogi tarcia. Czas ten wyniósł 1,5 min. Po tym czasie siła tarcia stabilizowała się na poziomie  $6,8-7,1 \text{ N}$  osiągając maksymalną wartość w 5 min (było to  $7,14 \text{ N}$ ).

W trakcie testów mierzono również temperaturę w komorze współpracujących elementów. Przy czym ze względu na konstrukcję testera możliwy był pomiar temperatury jedynie w odległości ok. 3



mm od punktu styku współpracujących ze sobą elementów. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono że przy zadanym obciążeniu temperatura nie miała istotnego wpływu na zużycie powierzchni, gdyż we wszystkich analizowanych wariantach nie przekroczyła wartości 26°C.



Rys. 6. Przebieg intensywności zużycia badanych próbek

Współczynnik tarcia  $\mu$  w przypadku powierzchni szlifowanej oscylował w podobnych granicach (0,68 w przypadku powierzchni piaskowanej oraz 0,70 w przypadku powierzchni szlifowanej).

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych stwierdzono, że w ciągu pierwszych 15 minut większym zużyciem charakteryzowała się próbka o wyższej wartości średniego arytmetycznego odchylenia nierówności powierzchni  $S_a$ , a więc po obróbce piaskowaniem. Sytuacja ta zmieniała się w trakcie kolejnych zatrzymań badań. Od 30 minuty testów zużycie objętościowe próbki szlifowanej było mniejsze niż próbki piaskowanej i sytuacja ta była odnotowywana już do końca prowadzonych badań. Najwyższą różnicę w zużyciu objętościowym pomiędzy poszczególnymi próbkami zaobserwowano w 45 min. testów.

W przypadku próbki piaskowanej najwyższy przyrost zużycia objętościowego zaobserwowano pomiędzy 15 a 30 min. testu. Wówczas przyrost zużycia objętościowego wyniósł 120%. Również w przypadku próbki szlifowanej największy przyrost zużycia objętościowego zaobserwowano pomiędzy 15 a 30 min. testu, przy czym zużycie objętościowe w tym czasie było mniejsze niż w przypadku próbki piaskowanej i wyniosło 88%.

Na podstawie przeprowadzonych badań tribologicznych można stwierdzić, że zarówno sposób ukształtowania struktury geometrycznej powierzchni (jej izotropowość) jak i jej chropowatość mogą wpływać na intensywność i wielkość zużycia elementów wykonanych ze stali 42CrMo4.

## BIBLIOGRAFIA

1. Aniołek K., Herian J., Sułkowski R., *Wybrane aspekty kształtowania mikrostruktury stali szynowej oraz jej wpływ na odporność na zużycie ściernie*. Hutnik-Wiadomości Hutnicze 2007, nr 5, s. 251-255.
2. Herian J., Aniołek K., *Zużycie tribologiczne kształtowników szynowych ze stali o różnej morfologii perlitu w rozjazdach kolejowych*. Inżynieria Materiałowa 2011, vol. 32 nr 1, s. 44-49.
3. Solski P., *Mechanizm zużycia a zmiany budowy i własności warstwy podpowierzchniowej*. Przegląd Mechaniczny 196, nr 13-14.
4. Blicharski M., *Inżynieria powierzchni*. WNT, Warszawa 2009.

5. Lawrowski Z., *Tribologia, Tarcie zużywanie smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
6. Hebda M., *Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn*. Instytut Technologii i Eksploatacji, Warszawa 2007.
7. Nosal S., *Tribologia, wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużywania i smarowania*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2012.
8. PN-EN ISO 25178-2:2012: Specyfikacje geometrii wyrobów (GPS) -- Struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna -- Część 2: Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.

## DETERMINATION OF WEAR INTENSITY ON THE BASIS OF ELEMENTS MADE FROM STEEL

### Abstract

*Tribological tests were conducted using a ball-on-disc tribotester. A steel disc of hardness 40 HRC was put in contact with a 100Cr6 steel ball of 6.35 mm diameter. Hardness of ball was 62 HRC. Hardness of steel 42CrMo4 disc was received after heat treatment (quenching – 830°C, cooling in oil and tempering – 550°C, cooling in air). Dry tests, using similar contact conditions were carried out. All tests were at least 3 times repeated. Disc samples were prepared using grinding (1 variant) and sand-blasting (2 variant) in order to obtain different values of the arithmetical mean height of the surface parameter  $S_a$ . In the case of grinding surface it was  $S_a = 0,227 \mu\text{m}$  and in the case of sand-blasting surface it was  $S_a = 3,49 \mu\text{m}$ . Ground surface was anisotropic ( $Str=0,0426$ ) and sand-blasting isotropic surface ( $Str=0,815$ ). Total intensity wear test lasted 1 hour, every after 15 min. tester was stopped and wear was measured. Wear of discs was measured using white light interferometer Talysurf CCI Light. The profiles, taken in four positions, 90° apart, perpendicular to wear track, were integrated using the interferometer software to obtain the wear scan area, then averaged and multiplied for the track length. During tests, the friction force was monitored as a function of time. Dry sliding tests were done at sliding speed of 0.157 m/s. Load was 10 N. In order to decrease variation of the experimental results, during tests the wear debris was continuously removed from the disc surface.*

Autor:

Dr inż. **Andrzej Dzierwa** – Politechnika Rzeszowska, Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, e-mail: adktniop@prz.edu.pl