

# PORÓWNAWCZE BADANIA ZUŻYCIA STALI HARDOX EXTREME W WARUNKACH TARCIA SUCHEGO. CZĘŚĆ 1.

Streszczenie

*W artykule omówiono zalety stali Hardox Extreme oraz przedstawiono wyniki badań tribologicznych próbek (wyciętych metodą hydroabrazijną) współpracujących w warunkach tarcia suchego z trzema różnymi próbkami ze stopów żelaza z węglem. Badania wykonano przy użyciu tribometru Amsler. Badania wykazały około 2-3-krotnie mniejszą intensywność zużycia stali Hardox Extreme na żeliwie ADI niż w przypadku współpracy tej stali w pozostałych badanych parach ciernych.*

**Słowa kluczowe:** badania tribologiczne, stal Hardox Extreme, tarcie, tribometr

## Wprowadzenie

W ostatnim okresie stale trudnościeralne stają się coraz szerzej stosowane. Wynika to przede wszystkim z pojawiających się na rynku coraz doskonalszych gatunków tych stali, przewyższających swoimi właściwościami tradycyjne stale odporne na ścieranie.

Stale typu Hardox jako formowalne, trudnościeralne produkowane są od początku lat 70. XX wieku. W ciągu prawie czterdziestu lat stale Hardox ulegały licznym udoskonaleniom w zakresie właściwości wytrzymałościowych, odporności na obciążenia dynamiczne, ścieralności i udarności. Ważnym wydarzeniem w historii produkcji tych stali było otwarcie w 1994 roku nowej linii hartowniczej w Oxelösund, która stanowiła istotny przełom w zakresie jakości (wymaganej płaskości) i zdolności produkcyjnej.

Wraz z otwarciem nowej walcowni w Borlänge na początku XXI wieku oferowana ze Szwecji paleta grubości blach została rozszerzona w zakresie od 0,7 aż do 160 mm. Aby zaspokoić rosnące zapotrzebowanie rynku europejskiego na tego typu stal rozpoczęto jej produkcję także w USA - w Mobile, w stanie Alabama oraz w Montpellier w stanie Iowa.

Walcarki SSAB, pozwalają na uzyskiwanie najwyższej precyzji tolerancji grubości nawet do 3 razy węższej niż wskazana w normie EN10029 class A oraz płaskości gwarantowanej przez AccuRollTech (www.accurolltech.com). Po procesie walcowania i hartowania każda blacha poddawana jest kontroli topograficznej, pozwalającej sprawdzić jej płaskość.

Obecnie na krajowym rynku stali do podstawowych gatunków Hardox można zaliczyć: HiTuf, 400, 450, 500, 550, 600 i Extreme HiTemp. Stale te różnią się między sobą właściwościami wytrzymałościowymi, twardością, udarnością, jednak wszystkie są gatunkami spawalnymi, które można giąć i obrabiać konwencjonalnymi metodami obróbki skrawaniem, wykorzystując narzędzia ze stali i węglików spiekanych.

Szczególnie interesująca jest stal Hardox Extreme o niespotykanej nominalnej twardości, produkowana przez hutę szwedzkiego koncernu SSAB Oxelösund, w zakresie grubości blach od 8 do 19 mm, szerokości arkusza do 2000 mm i długości do około 14500 mm [1].

Dlatego też można spodziewać się w najbliższej przyszłości ekspansji tego gatunku i znacznego wykorzystania stali Hardox Extreme w produkcji innowacyjnych maszyn roboczych, w tym rolniczych.

Doskonałe właściwości tribologiczne są niezwykle istotne w rolnictwie, szczególnie w odniesieniu do narzędzi roboczych maszyn i urządzeń rolniczych.

Trwałość eksploatacyjna elementów roboczych maszyn i urządzeń rolniczych jest bardzo istotna z punktu widzenia eksploatacji kompletnych zespołów maszyn. Jest to spowodowane pracą w bardzo trudnych często warunkach eksploatacji w warunkach znacznego obciążenia mechanicznego i tribologicznego. Zintensyfikowanie procesu zużywania się elementów prowadzi do zmniejszenia sprawności i wydajności pracy zespołów urządzeń i maszyn. Proces zużywania się może zostać dodatkowo przyspieszony przez oddziaływanie obciążeń udarowych i procesów korozji elektrochemicznej i naprężeniowej. Współpraca ślizgowa różnych materiałów w warunkach tarcia suchego jest często bardzo ważna, bo decyduje o trwałości eksploatacyjnej węzła i całego zespołu [2, 4].

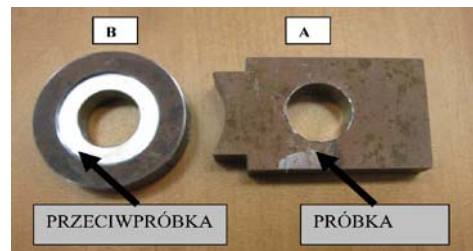
W artykule przedstawiono porównawcze wyniki badań, przy użyciu tribometru Amsler (w warunkach tarcia suchego), próbek ze stali Hardox Extreme we współpracy cierniej z próbkami wybranych stopów żelaza z węglem, zaliczanych do trudnościeralnych.

## Przedmiot badań

Przedmiotem badań tribologicznych były próbki wycięte metodą hydroabrazijną ze stali Hardox Extreme o grubości 10 mm.

Widok próbek do badań tribologicznych przy użyciu tribometru Amsler przedstawiono na rys. 1.

Jako przeciwpróbki użyto stal *Hardox Extreme*, żeliwo sferoidalne obrobione izotermicznie (ADI) oraz stal Hardox 450.



Rys. 1. Kształt próbek A i B do badań tribologicznych, wyciętych z kawałka blachy Hardox Extreme

Fig. 1. The shape of the samples A and B prepared for tribological research, cut from sheet of Hardox Extreme steel

Próbki stali Hardox Extreme poddano weryfikacji pod kątem składu jakościowego i ilościowego pierwiastków. Badania składu chemicznego próbek blachy wykonano przy użyciu analizatora stali SOLARIS i porównano ze składem chemicznym katalogowym (z kadzi) - tab. 1 i 2.

Tab. 1. Skład chemiczny próbki stali Hardox Extreme  
Table 1. Chemical composition of Hardox Extreme steel sample

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,53	0,13	0,54	0,013	0,001	0,695	2,12	0,149	0,001

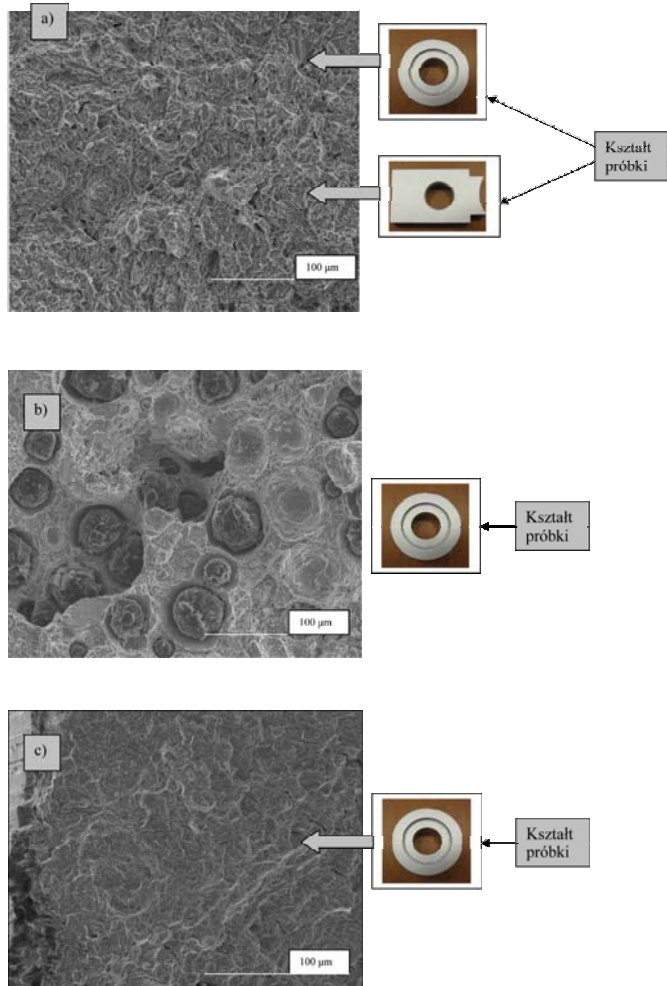
Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Tab. 2. Skład chemiczny stali Hardox Extreme (analiza w kadzi) katalogowo  
Table 2. Chemical composition of Hardox Extreme steel (analysis from casting ladle)

C (max %)	Si (max %)	Mn (max %)	P (max %)	S (max %)	Cr (max %)	Ni (max %)	Mo (max %)	B (max %)
0,47	0,50	1,40	0,015	0,010	1,20	2,50	0,80	0,005

Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Na rys. 2 przedstawiono mikrostruktury oraz typy próbek stali użytych do badań tribologicznych.



Rys. 2. Struktury topografii przełamów materiałów i kształty próbek użyte w toku badań tribologicznych: a) stal Hardox Extreme, b) żeliwo sferoidalne ausferytyczne ADI, c) stal Hardox 450

Fig. 2. Topography structures of materials' fractures and shapes of samples used in tribological research: Hardox Extreme steel (a), nodular ADI cast iron (b), Hardox 450 steel (c)

Skład chemiczny przeciwpróbek użytych do badań tribologicznych wykonano przy użyciu analizatora spektrometru iskrowego SOLARIS i przedstawiono w tab. 3 i 4.

Tab. 3. Skład chemiczny stali Hardox 450  
Table 3. Chemical composition of Hardox 450 steel

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	B (%)
0,258	0,241	1,047	0,014	0,010	0,260	0,25	0,152	0,002

Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Tab. 4. Skład żeliwa ADI  
Table 4. Chemical composition of ADI cast iron

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Mg (%)	Ni (%)	Cu (%)	Mo (%)
3,55	2,20	0,23	0,05	0,015	0,045	1,95	0,98	-

Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Podstawowe parametry wytrzymałościowe materiałów użytych do badań tribologicznych przedstawiono w tab. 5.

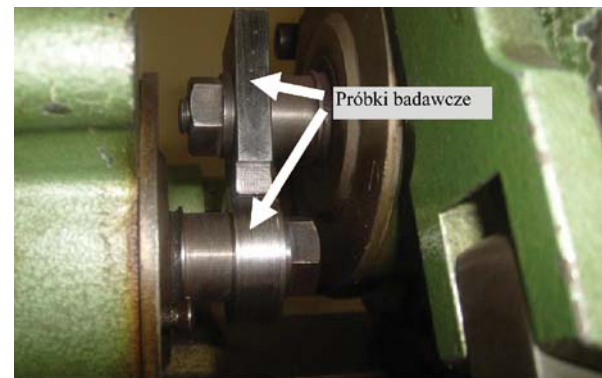
### Metodyka badań

Badania tribologiczne próbek metalowych przeprowadzono przy użyciu maszyny do badania ścieralności metali typu Amsler - A135, produkcji szwajcarskiej. Maszyna umożliwia prowadzenie badań ścieralności przy ruchu obrotowym, w zakresie obciążeń badanych próbek 0-2000 N, przy dwóch prędkościach obrotowych wałka, wynoszących 200 i 400 obr. min<sup>-1</sup> (0,42 i 0,84 m·s<sup>-1</sup>), w warunkach tarcia suchego lub przy zastosowaniu smarowania. Widok maszyny przedstawiono na rys. 3, natomiast widok próbek zamocowanych w tribometrze na rys. 4.



Rys. 3. Widok tribometru Amsler do badania odporności na ścieranie

Fig. 3. View of Amsler tribometer used for wear resistance analysis



Rys. 4. Widok próbek zamocowanych w tribometrze Amsler

Fig. 4. View of samples fixed in Amsler tribometer

Tab. 5. Podstawowe parametry wytrzymałościowe materiałów użytych do badań tribologicznych  
Table 5. Basic strength parameters of materials used in tribological research

Lp.	Material	Wytrzymałość na rozciąganie Rm* [MPa]	Granica plastyczności Re* [MPa]	Udarność* KCU [J/cm <sup>2</sup> ]	Twardość Rockwella* [HRC]	Wydłużenie względne A [%]
1.	Stal Hardox Extreme	2178	1356	47,2	62	3,5
2.	Żeliwo ADI	1170	744	7,4	38	1,8
3.	Stal Hardox 450	1400	1200	-	36	10

\* wartości średnie z 8 pomiarów

Badania prowadzono zgodnie z normą PN-82/H- 04332 pt. „Badanie zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera”. Zastosowano metodę „A”, przy tarcu suchym (bez smarowania). Badania prowadzono w układzie próbki wklęsła (nieruchoma) - próbka okrągła (ruchoma). Obciążenie próbek metalowych wynosiło 600 N, zgodne z metodyką badań tribologicznych na maszynie Amslera opracowaną w Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych w Poznaniu. Obroty próbki (okrągłej) wynosiły 200 obr.·min<sup>-1</sup>, (0,42 m·s<sup>-1</sup>) [3]. Zgodnie z zaleceniami normy dla wszystkich par próbek przeprowadzono wstępne docieranie (nieuwzględniane w wynikach), które trwało 30 min (1800 s).

Zużycie określano metodą wagową, dokonując co określony czas (7200 s) pomiarów masy próbek za pomocą elektronicznej wagi analitycznej Sartorius, o zakresie udźwigu 0,0001-200 g. Każdą parę badano co 2, 4 i 6 h, z dokładnością do ±0,0002 g.

Obliczono różnice zużycia odpowiednio po 2, 4 i 6 h przebiegu, tj. po przebyciu przez każdą z próbek danej pary ciernej, w ciągu 2 h, drogi s = 3024 m. Na podstawie zużycia wagowego próbki Z<sub>pw</sub>, obliczono także intensywność zużycia I<sub>pw</sub> według wzoru:

$$Z_{pw} = m_{zc} - m_o \quad [g]$$

$$I_{pw} = \frac{Z_{pw}}{s} \quad [g \cdot m^{-1}]$$

gdzie: I<sub>pw</sub> - intensywność zużycia wagowego [g·m<sup>-1</sup>],  
Z<sub>pw</sub> - zużycie wagowe próbki w okresie ustalonego przebiegu zużycia [g],  
m<sub>zc</sub> - masa próbki po zużyciu [g],  
m<sub>o</sub> - masa próbki po dotarciu [g],  
s - całkowita droga tarcia [m].

## Wyniki badań

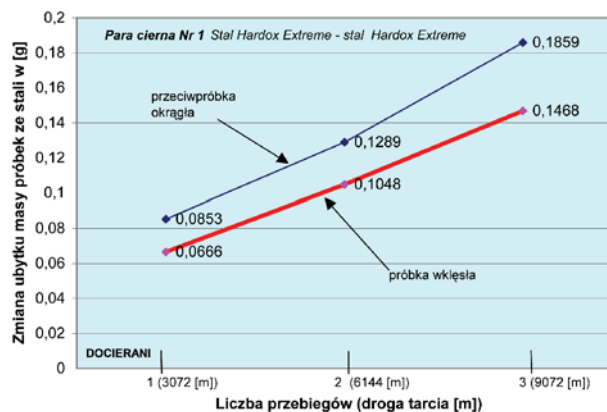
W tab. 6 oraz graficznie na rys. 5-8 przedstawiono wyniki obliczeń zużycia poszczególnych próbek trzech par ciernych, poddanych badaniom zużycia przy użyciu tribometru Amsler, w warunkach tarcia suchego.

Tab. 6. Zbiorne wyniki badań tribologicznych  
Table 6. Results of tribological research

Lp.	Kształt próbki pary ciernej	Material	Ubytek masy Z <sub>pw</sub> [g]	Intensywność zużycia I <sub>pw</sub> [g·m <sup>-1</sup> ]	Czas pracy [h]	Droga tarcia s [m]	Twardość Rockwella [HRC]
Numer pary ciernej 1							
1.	Próbka okrągła	Hardox Extreme	0,1859	2,0492·10 <sup>-3</sup>	6	9072	40
2.	Próbka wklęsła	Hardox Extreme	0,1468	1,6182·10 <sup>-3</sup>			62
Numer pary ciernej 2							
3.	Próbka okrągła	ADI	0,1841	2,0293·10 <sup>-3</sup>	6	9072	38
4.	Próbka wklęsła	Hardox Extreme	0,0451	0,4971·10 <sup>-3</sup>			62
Numer pary ciernej 3							
5.	Próbka okrągła	Hardox 450	0,4337	4,7806·10 <sup>-3</sup>	6	9072	36
6.	Próbka wklęsła	Hardox Extreme	0,0958	1,0560·10 <sup>-3</sup>			62

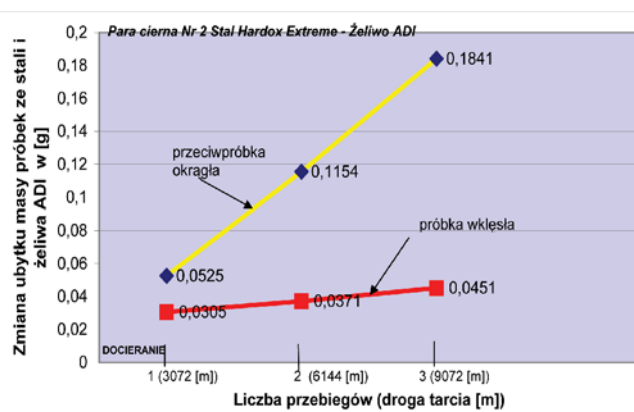
Źródło: opracowanie własne / Source: own work

badania własne wykonane w PIMR, IO, WAT  
Źródło: opracowanie własne / Source: own work



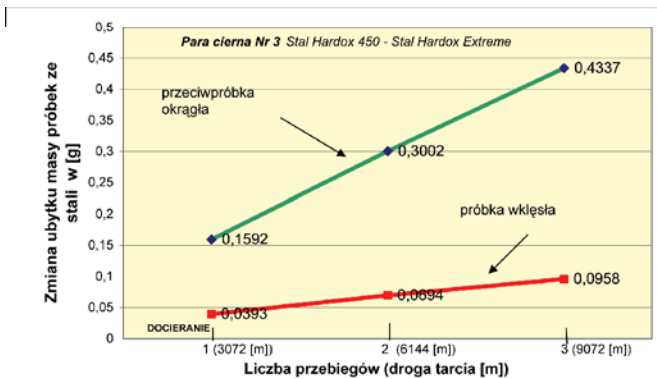
Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Rys. 5. Zmiana ubytku masy próbek ze stali (para ciera nr 1) w zależności od liczby przebiegów (drogi tarcia s [m])  
Fig. 5. Transition of weight loss of the steel samples (friction pair no. 1) depending on the number of repeats (value of friction path s [m])



Źródło: opracowanie własne / Source: own work

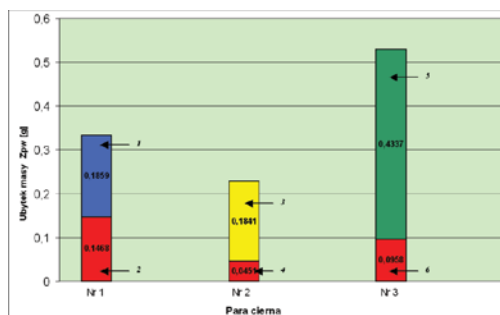
Rys. 6. Zmiana ubytku masy próbek ze stali (para ciera nr 2) w zależności od liczby przebiegów (drogi tarcia s [m])  
Fig. 6. Transition of weight loss of the steel samples (friction pair no. 2) depending on the number of repeats (value of friction path s [m])



Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Rys. 7. Zmiana ubytku masy próbek ze stali (para cierna nr 3) w zależności od liczby przebiegów (drogi tarcia s [m])

Fig. 7. Transition of weight loss of the steel samples (friction pair no. 3) depending on the number of repeats (value of friction path s [m])

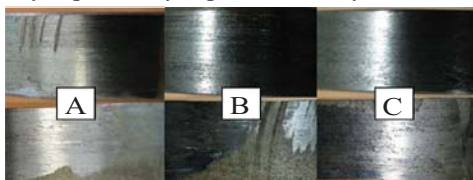


Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Rys. 8. Ubytek masy poszczególnych próbek w parze cierniej nr 1, 2, 3 (gdzie 1- 6 liczby porządkowe próbek według tab. 6)

Fig. 8. Weight loss of samples in friction pair 1, 2 and 3 (where 1-6 are the ordinal numbers of samples according to the table 6)

Topografię powierzchni tarcia próbek po ścieraniu poszczególnych par ciernych pokazano na rys. 9.



Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Rys. 9. Widok topografii powierzchni tarcia próbek „Amslera” po ścieraniu: a) para cierna: stal Hardox Extreme - Hardox Extreme, b) para cierna: stal Hardox Extreme - żeliwo ADI, c) para cierna: stal Hardox Extreme - Hardox 450

Fig. 9. View of the friction surface topography of Amsler's samples after the process of attrition: friction pair consists of Hardox Extreme and Hardox Extreme (a), friction pair consists of Hardox Extreme and ADI iron cast (b), friction pair consists of Hardox Extreme and Hardox 450 (c)

## COMPARATIVE TRIBOLOGICAL RESEARCH OF HARDOX EXTREME STEEL IN THE DRY FRICTION CONDITIONS. PART. 1.

### Summary

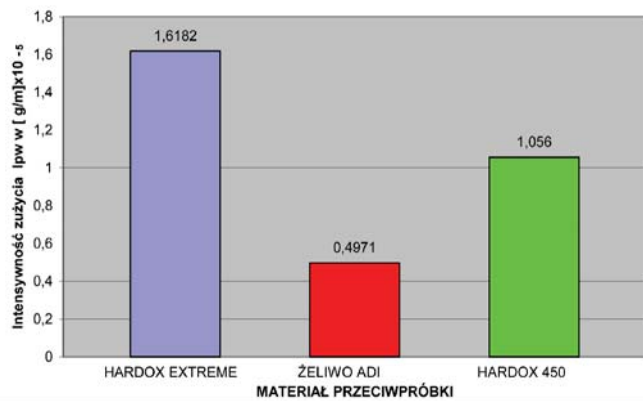
The authors in this study discussed the advantages of Hardox Extreme steel and presented the results of the tribological research of samples (cut out by hydro-abrasion process) which cooperate with three completely different samples made of iron alloy of carbon in dry friction conditions. The research was carried out with the use of Amsler tribometer. The analysis showed about 2-3 times lesser intensity of wearing-out of Hardox Extreme steel cooperating with ADI cast iron than another friction pairs.

**Key words:** tribological research, Hardox Extreme steel, friction, tribometer

### Podsumowanie

Badania tribologiczne stali Hardox Extreme wykazały jej dobrą odporność na ścieranie i mały ubytek masy, nawet we współpracy z materiałami o dużej twardości (38-62HRC).

Spośród badanych par ciernych najmniejsze zużycie zanotowano we współpracy z żeliwem ADI. Intensywność zużycia stali Hardox Extreme w tej parze była 2-3-krotnie mniejsza od zużycia tej samej stali we współpracy z pozostałymi materiałami (rys. 10).



Źródło: opracowanie własne / Source: own work

Rys. 10. Wpływ rodzaju materiału przeciwpółki na intensywność zużycia stali Hardox Extreme w warunkach tarcia suchego, przy użyciu tribometru Amsler

Fig. 10. Influence of the counter-sample's material type on the intensity of wear of the Hardox Extreme steel during dry friction

Wyniki wykonanych badań potwierdzają dobrą współpracę stali Hardox Extreme o wysokich wartościach parametrów wytrzymałościowych i twardości z żeliwem ADI zaliczanym także do materiałów trudnościeralnych. Wiedza na ten temat może być bardzo istotna i przydatna dla konstruktorów maszyn roboczych, w tym rolniczych, wykorzystujących w swoich rozwiązaniach rozmaite węzły ślizgowe.

### Bibliografia

- [1] Materiały informacyjne firmy SSAB. Trudnościeralna blacha Hardox - twarda i mocna stal dla agresywnych środowisk pracy: [www.accurolltech.com](http://www.accurolltech.com).
- [2] Nosal St.: Tribologia. Wprowadzenie do zagadnień tarcia, zużycia i smarowania. Wyd. Politechniki Poznańskiej, 2012.
- [3] PN-82/H-04332: Badania wytrzymałościowe metali. Badanie odporności na zużycia metali lub ich warstw dyfuzyjnych w procesie tarcia ślizgowego przy stałym nacisku na maszynie Amslera
- [4] Szczerek M., Wiśniewski M.: Tribologia i trybotechnik., Instytut Technologii Eksploatacji Radom, 2000.