

Łukasz WIERZBICKI\*, Andrzej PUSZ

Politechnika Śląska, Instytut Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych

\* e-mail: lukasz.wierzbicki@polsl.pl

## Ocena własności tribologicznych żywicy epoksydowej napełnionej stopem Lipowitz'a

*Streszczenie.* W pracy przedstawiono badania nad własnościami trybologicznymi kompozytów żywic epoksydowych napełnionych stopem Lipowitz'a, podczas współpracy z elementami wykonanymi z różnych materiałów. Ideą stworzenia takiego kompozytu było wprowadzenie do osnowy polimerowej napełniacza metalicznego, który pod wpływem ciepła powstałego w wyniku tarcia, uległby stopieniu tworząc płynną warstwękę zmniejszającą tarcie. Badania zostały przeprowadzone w powietrzu, w temperaturze pokojowej oraz w oleju silikonowego (OM-100). Badania przeprowadzono w temperaturach 30 °C, 50 °C, 70 °C oraz 90 °C.

THE TRIBOLOGICAL PROPERTIES EVALUATION OF EPOXY RESIN FILLED BY LIPOWITZ ALLOY

*Summary.* This paper presents research of the tribological properties of epoxy resin filled by Lipowitz alloy, during co-working with parts made of different materials. The main concept of creating this type of composite was the insertion a metal fillers to the polymer matrix. The metal, which due to the heat produced by friction, has to melt to form a liquid layer reduces the friction. The one part of tests was conducted in air at room temperature. The second part of test made with the participation of silicone oil (OM-100). This test made at 30 °C, 50 °C, 70 °C and 90 °C temperature.

### 1. WSTĘP

Jednym z istotniejszych zjawisk fizyki życia codziennego jest tarcie. Bez tego procesu nie moglibyśmy się poruszać, zachować równowagi czy wykonywać jakichkolwiek prac. Mimo potrzeby istnienia tarcia to bardzo znacząca ilość energii, w skali globalnej, wykorzystywana jest na pokonanie siły oddziaływań tego zjawiska. Są dziedziny techniki i życia codziennego gdzie dąży się do minimalizowania siły tarcia. Dotyczy to także, wszystkich obszarów zastosowań materiałów polimerowych. Materiały polimerowe są, zresztą, często stosowane jako ekonomiczna alternatywa metalowych łożysk tocznych.

#### 1.1. Własności tribologiczne materiałów polimerowych

Pod wpływem zjawiska tarcia, niestety powierzchnia zewnętrzna materiału polimerowe-

go ulega zużyciu ściernemu. Proces ten jest skutkiem występowania na powierzchni nierówności bądź też obecnością twardych cząstek obcego materiału – zwykle cząstek napełniaczy lub zanieczyszczeń.

Uważa się że mechanizmy tarcia materiałów polimerowych są odmienne niż te występujące przy tarcu metali. Wynika to przede wszystkim z odmiennego przebiegu mechanizmu transportu ciepła oraz znacznie różniących się współczynników przewodzenia ciepła. Uważa się że procesy tarcia polimerów nie są jeszcze do końca zidentyfikowane oraz poznane [1-4].

Zużycie cierne materiałów zależy przede wszystkim od sił zapewniających spójność wewnętrzną materiału, czyli kohezję. Dużą spójność, którą charakteryzują się materiały polimerowe, zyskują na skutek sumowania się różnego rodzaju sił międzycząsteczkowych. Polimery, które są dielektrykami charakteryzują się dużą skłonnością do elektryzowania się.

Pojawienie się ładunków elektrostatycznych na powierzchni materiału powoduje zwiększenie sił adhezyjnych, w wyniku czego zwiększa się wartość siły tarcia w parze trącej [1,2].

Materiały polimerowe, w porównaniu do metali, wykazują znacznie mniejszą zdolność do odprowadzania powstającego na skutek tarcia ciepła. Ciepło może się kumulować, w skrajnych przypadkach wpływając na strukturę materiału. Powstałe zmiany mogą być odwracalne (np. mięknienie materiału) bądź też nieodwracalne (np. degradacja). Zmiany te w znaczący sposób wpływają na warunki tarcia współpracujących powierzchni [5].

Próby uzyskania materiałów charakteryzujących się lepszymi własnościami ślizgowymi są realizowane poprzez syntetyzowanie nowych materiałów bądź modyfikację już istniejących. Synteza nowych materiałów polimerowych jest procesem kosztownym i wymagającym wielu nakładów sprzętu, ludzi i czasu. Z tych powodów najpopularniejsze jest pozyskiwanie nowych materiałów ślizgowych wykorzystując modyfikację już istniejących. Modyfikacje są prowadzone w różnych fazach przetwórstwa materiałów polimerowych, tzn. podczas wytwarzania materiałów oferowanych w handlu, na etapie wytwarzania półfabrykatów lub też po wykonaniu gotowego wyrobu. Do najczęściej stosowanych modyfikacji należą: modyfikacja chemiczna, obróbka cieplna, modyfikacja warstwy wierzchniej elementu za pomocą np. implantacji jonowej, modyfikacja przez wprowadzanie różnego rodzaju dodatków między innymi napełniaczy.

Modyfikacja może zachodzić samoistnie np. podczas procesu docierania w materiałach ślizgowych wytwarza się warstwa powierzchniowa o podwyższonych właściwościach tribologicznych [4,6,7].

Jedną z najprostszych i najtańszych metod jest napełnianie materiałów polimerowych różnego rodzaju cząstkami, włóknami, które wpływają na własności tribologiczne lub wytrzymałościowe, bazowego materiału polimerowego. Stosowane napełniacze powinny w znaczącym stopniu zmniejszać wartość współ-

czynnika tarcia lub intensywność zużycia modyfikowanego polimeru – zarówno w warunkach tarcia suchego lub w przypadku ograniczonego smarowania [3,6,7].

Spośród najczęściej stosowanych napełniaczy metalicznych, można wymienić: niektóre metale (np. cyna, miedź, ołów), stopy łożyskowe (np. brązy, mosiądze), tlenki niektórych metali (jak:  $Al_2O_3$ ,  $MgO$ ,  $Cu_2O$ ,  $TiO_2$ ). Z napełniaczy niemetalicznych najczęściej stosowane są: polimery (np. PTFE, PE, różnego rodzaju żywice), napełniacze mineralne (np. kreda, mika) oraz substancje, takie jak:  $MoS_2$ , sadza, grafit, włókno węglowe, włókno szklane oraz wiele innych [2,8,9].

Należy pamiętać, że oprócz samego materiału badanego, w procesie tarcia ważna jest jeszcze druga powierzchnia oddziałująca na materiał badany. Dlatego rozpatruje się całą parę trącą. Spośród wielu parametrów mających wpływ na właściwości tribologiczne współpracy ślizgowej układu materiał polimerowy – przeciwpróbka, najbardziej istotne są: temperatura tarcia, prędkość ślizgania i nacisk powierzchniowy [2,10-12].

Celem prezentowanych badań było stwierdzenie czy użycie jako napełniacza stopu niskotopliwego, o temperaturze topnienia  $80\text{ }^\circ\text{C}$ , wpłynie znacząco na wartość współczynnika tarcia przy różnych parach trących.

## 1.2. Stopy niskotopliwe

Ideą badań przedstawionych w tym artykule było wprowadzenie do osnowy polimerowej napełniacza metalicznego, który pod wpływem ciepła powstałego w wyniku tarcia, uległby stopieniu tworząc płynną warstewkę zmniejszającą tarcie.

Oczywiście, stopienie powszechnie używanych stopów metali wymagałoby takiego strumienia ciepła, który w większości wypadków spowodowałby degradację termiczną materiału polimerowego. Istnieje, natomiast, grupa stopów tzw. niskotopliwych, których temperatura topnienia nie przekracza  $200\text{ }^\circ\text{C}$ . Są to stopy, które znalazły zastosowanie w odlewnic-

twie, w szybkim wykonywaniu prototypów, w mocowaniu różnych przedmiotów (np. szkielek) podczas obróbki ubytkowej, a także w elektrotechnice i jest to grupa materiałów ściśle określona poprzez normy przedmiotowe np.: PN-91/H-87203, ASTM B774-00).

Stopy niskotopliwe to materiały złożone zazwyczaj z bizmutu, ołowiu, cyny i innych pierwiastków. Użyty, w przedstawionych, badaniach stop Lipowitza (wg polskiej normy PN-91/H-87203 oznaczenie TBC13) to mieszanina bizmutu w 50%, ołowiu w 27%, cyny w 13% i kadmu w 10% wagowych. Temperatura topnienia tego stopu to 80°C.

## 2. BADANIA WŁASNE

### 2.1. Materiał badawczy

Eksperyment przeprowadzono na próbkach kompozytów o osnowie żywicy epoksydowej Epidian 6 usieciowanej utwardzaczem Z1 (mieszane w proporcji wagowej 100:13) produkcji „Organika-Sarzyna”, napełnionej stopem Lipowitza zakupionym w firmie „Innovator” z Gliwic. Z powyższych materiałów wykonano próbki o 20% udziale wagowym stopu w żywicy.

### 2.2. Przygotowanie próbek badawczych

Próbki badawcze przygotowano według następującej procedury:

- odmierzono odpowiednie ilości składników,
- stop Lipowitza ogrzano w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze 140°C aż do całkowitego stopienia. Zabieg ten stosowano by przetopić nie tylko stop, ale także trudniej topliwe tlenki na powierzchni stopu,
- stop przelano do stalowej zlewki z płaszczem grzewczym w którym krążył olej silikonowy o temperaturze 90°C. Cyrkulacja oleju oraz jego temperatura była wymuszona pracą ultratermostatu,
- stop z żywicą wymieszano za pomocą tarczy dyspersyjnej – typu „Z”, na mieszalniku

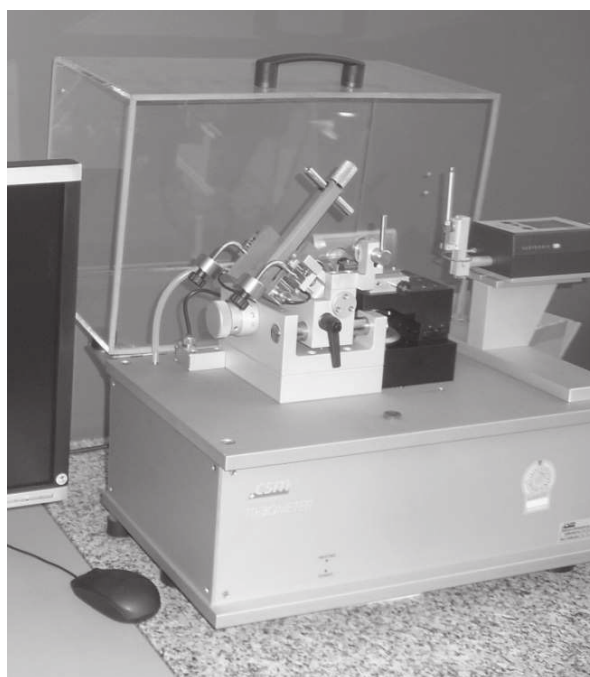
wysokoobrotowym Dispermat LC30 produkcji VMA-GETZMANN GMBH. Prędkość obwodowa mieszania wynosiła 21,5 m/s, czas mieszania to 15 minut,

- do mieszaniny epidianu 6 i stopu Lipowitza, po ochłodzeniu, dodano utwardzacz i wymieszano całość ręcznie za pomocą szpatułki,
- gotową mieszaninę odlano do form stalowych, formując próbki na kształt krążków o średnicy 25 mm i wysokości 3 mm,
- próbki utwardzono w suszarce laboratoryjnej, w temperaturze 24°C w czasie 24 godzin,
- powierzchnię swobodną uzyskanych próbek badawczych, poddano szlifowaniu w celu usunięcia powstałego menisku.

Badania mikroskopowe struktur uzyskanych kompozytów, żywic epoksydowych stopów niskotopliwych, były przedstawiane w pracach [13-15].

### 2.3. Badania

Właściwa część badań polegała na wyznaczeniu współczynnika tarcia kompozytu żywi-



Rys. 1. Trymometr CSM

cy epoksydowej napełnionej stopem Lipowitza na trybometrze metodą „pin-on-disk” (Rys. 1).

Badania przeprowadzono z zastosowaniem przeciwpróbek o średnicy  $\varnothing 6$  mm wykonanych z różnych materiałów, między innymi z: tlenku glinu ( $Al_2O_3$ ), szkła borokrzemianowego oraz stali kwasoodpornej (AISI 316).

Badania zostały przeprowadzone na Trybometrze CSM. Badanie polegało na zamocowaniu przygotowanych wcześniej próbek w zacisku trybometru, wyważeniu ramienia z zamocowaną przeciwpróbką, a następnie obciążeniu ich siłą.

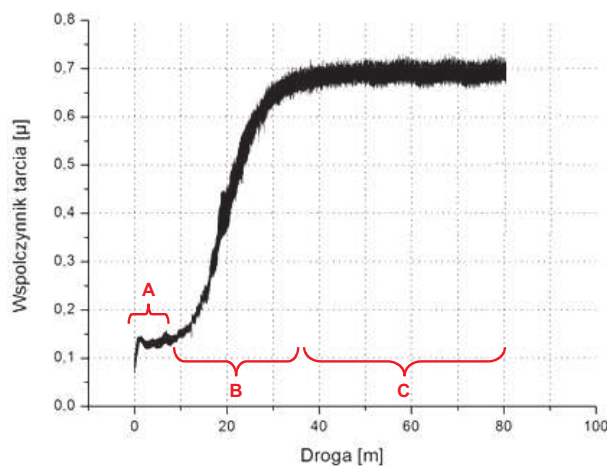
Po wykonaniu kilku wstępnych prób, wybrano obciążenie przeciwpróbki siłą 7 N. W początkowej fazie przeprowadzano badania testowe w temperaturze pokojowej. Konstrukcja trybometru umożliwia badanie w podwyższonej temperaturze jednakże tylko w cieczach. Z tych powodów zbiornik z próbką dodatkowo wypełniono olejem silikonowym OM 100 i dobrano różne temperatury. Drogę jaką przeciw próbka przebywała po próbce została określona na podstawie badań wstępnych i wynosiła 70 metrów. Po przebyciu tej drogi podczas badania, wartość współczynnika tarcia uległa stabilizacji.

Próbki badano w temperaturze 30 °C, 50 °C, 70 °C oraz 90 °C.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Otrzymane wyniki badań z trybometru pozwoliły na określenie zależności współczynnika tarcia od drogi, co zostało przedstawione w postaci wykresów. Poniżej przedstawiono przykładowy wykres (Rys. 2). Następnie wyniki badań poddano dalszej analizie.

Na wykresie (Rys. 2) przedstawiono fazy zachodzące podczas procesu tarcia po przebyciu określonej drogi. Ich kształt oraz miejsce ich wystąpienia jest różny w zależności od materiału przeciwpróbki i warunków badania. Faza A – jest to faza docierania się próbki, która wynika przede wszystkim z chropowatości powierzchni próbki. Faza ta miała bardzo różny



Rys. 2. Wykres przebiegu zmian współczynnika tarcia dla pary stal kwasoodporna / kompozyt żywicy epoksydowej napełnionej stopem Lipowitza w temperaturze otoczenia (około 24 °C). Objaśnienia w tekście.

przebieg – wartość współczynnika tarcia potrafiła wzrastać by za chwilę maleć, lub od razu wzrastać. W fazie B następuje gwałtowny wzrost współczynnika tarcia, natomiast faza C przedstawia ustabilizowanie wartości współczynnika tarcia. Dla poniższego wykresu stabilizacja zaczęła się kształtować w okolicach 35 metra przebytej drogi i po około 50 metrach ustabilizowała się na stałym poziomie. Prędkość liniowa dla wszystkich prób wynosiła 5 cm/s.

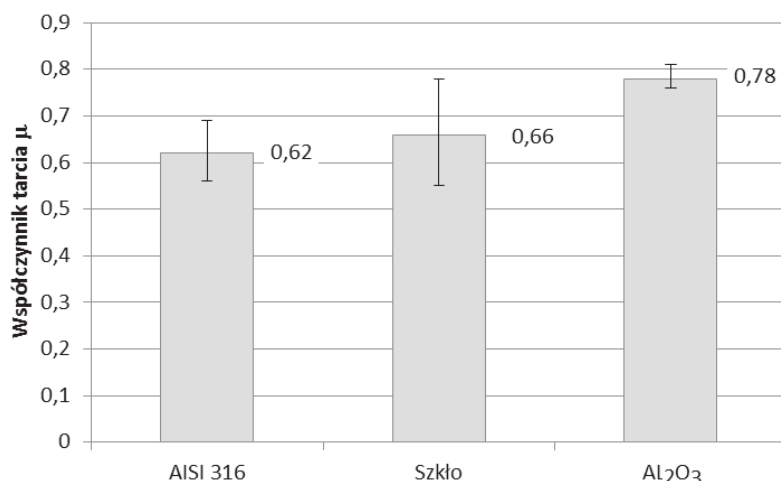
Na rysunku 3 przedstawiono wyniki pomiarów współczynnika tarcia dla różnych par trących. Wszystkie badania przeprowadzono w stałej temperaturze 24°C, bez udziału jakichkolwiek środków smarujących.

Najmniejszą uśrednioną wartość współczynnika tarcia uzyskano w parze z stalą kwasoodporną. Natomiast badanie przeprowadzone z użyciem przeciwpróbki z tlenku glinu wykazały się najmniejszym rozrzutem wyników.

W kolejnym etapie przeprowadzono badania w podwyższonych temperaturach oraz przy udziale oleju silikonowego (Rys. 4).

Jak można zauważyć, dostarczone do układu ciepło znacząco wpłynęło na wartość współczynnika tarcia. W każdym przypadku zauważono spadek współczynnika tarcia, naj-





Rys. 3. Współczynniki tarcia badanego kompozytu określone dla trzech różnych par trących. Badanie przeprowadzone w temperaturze 24°C bez udziału mediów smarujących.

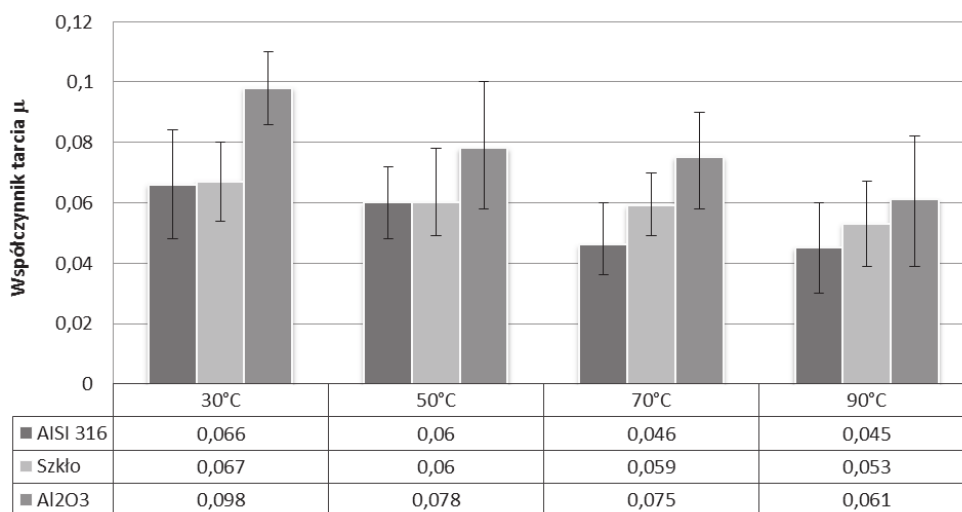
większy dla temperatury 90°C. Tabela 1 zawiera zmiany współczynnika tarcia określone jako procent średniego współczynnika tarcia w temperaturach 30-90°C, w obecności oleju silikonowego OM 100.

Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że największe zmiany osiągnięto dla badań gdzie materiał kompozytu tworzył parę trącą z tlenkiem glinu. Przypuszcza się że zjawisko to może mieć związek z przewodnością cieplną samej przeciwpróbki, gdyż tlenek glinu ma największy współczynnik przewodzenia cie-

Tabela 1. Zmiany współczynnika tarcia w zależności od temperatury badania

Materiał przeciwpróbki	Temperatura badania			
	30°C	50°C	70°C	90°C
AISI 316	100 %	91 %	70 %	68 %
Szło	100 %	90 %	88 %	79 %
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	100 %	80 %	77 %	62 %

pła (30,0 W/mK), a dla stali AISI 316 współczynnik przewodzenia ciepła wynosi 16,3 W/mK [16]. Przeciw próbka szklana charakte-



Rys. 4. Współczynniki tarcia badanego kompozytu określone dla trzech różnych par trących. Badanie przeprowadzone w różnych temperaturach z udziałem oleju silikonowego OM-100.

ryzuje się najmniejszymi zmianami współczynnika tarcia jednocześnie ma najmniejszy współczynnik przewodzenia ciepła (1,10 W/mK) [16].

Porównując badania przeprowadzone na sucho w temperaturze 24°C z badaniami przeprowadzonymi w oleju, w temperaturze 30°C, można stwierdzić, że wartość współczynnika tarcia wynosi ok. 10% wartości uzyskanej dla próbki badanej w powietrzu.

#### 4. WNIOSKI

Przeprowadzone badania pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

1. Wraz ze wzrostem temperatury następuje zmniejszenie współczynnika tarcia dla każdej z par trących,
2. Najniższy średni współczynnik tarcia występuje podczas współpracy kompozytu z przeciwpróbką wykonaną ze stali kwasoodpornej,
3. Największe zmiany współczynnika tarcia zauważono dla pary trącej kompozyt-tlenek glinu,
4. Uzyskane wyniki potwierdzają tezę, że cząstki stopu niskotopliwego mogą, po stopieniu, istotnie wpływać na obniżenie współczynnika tarcia.

#### Literatura

- [1] Jaworski J., Okładziny cierne do hamulców i sprzęgieł pojazdów mechanicznych, Warszawa 1984.
- [2] Lawrowski Z., Tribologia – tarcie, zużywanie i smarowanie, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
- [3] Rymuza Z., Trybologia polimerów ślizgowych. WNT, Warszawa 1986.
- [4] Wieleba W., Capanidis D., Ziemiański K., Polimerowe łożyska ślizgowe z tworzyw termoplastycznych. Cz. I – Materiały ślizgowe. Poradnik tribologii i tribotechniki (23) – wkładka do TRIBOLOGII Nr 6/95, s.125÷131.
- [5] Hejowski T., Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowania struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Lubuskiej, 2003.
- [6] Szczerek M., Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 1997.
- [7] Szlezinger W., Tworzywa Sztuczne, Rzeszów 1989.
- [8] Wilczyński K., Reologia a przetwórstwie tworzyw sztucznych, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2001.
- [9] Ziemiański K., Tworzywa sztuczne w konstrukcji wybranych zespołów maszynowych. Wrocław 1985.
- [10] Broniewski T., Kapko J., Płaczek W., Thomalla J., Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych. Warszawa, WNT, 1998.
- [11] Bros J., Janecki J., Zjawiska tarcia i zużywania oraz kształtowania własności tworzyw ciernych Materiały I. krajowego kolokwium trybologicznego, Zeszyt – 4; Janów Lubelski, Warszawa-Sulejówek, 1978.
- [12] Hejowski T., Studium procesów zużywania erozyjnego, ściernego i zmęczenia cieplnego elementów maszyn oraz kształtowania struktur o korzystnych właściwościach eksploatacyjnych. Wydawnictwo Politechniki Lubuskiej, 2003.
- [13] Stabik J., Wierzbicki Ł., Epoxy resins and low melting point alloy composites, Archives of Materials Science and Engineering 48/1 (2011) 5-11.
- [14] Wierzbicki Ł., Stabik J., Epoxy composites filled with Wood's alloy, Proceeding of the International Scientific Conference on the Contemporary Achievements in Mechanics, Manufacturing and Materials Science, 81.
- [15] Stabik J., Wierzbicki Ł., Influence of low melting point alloy on strength properties of epoxy resin, Archives of Materials Science and Engineering 60/1 (2013) 13-23.
- [16] Witryna internetowa: [www.matweb.com](http://www.matweb.com) – 13.01.2014 r.