

IMPLANTACJA JONOWA JAKO SPOSÓB KONSTYTUOWANIA WARSTWY WIERZCHNIEJ PODZESPOŁÓW SILNIKÓW SPALINOWYCH

Silnik spalinowy jest obecnie jednym z najpowszechniej stosowanych jednostek napędowych w pojazdach samochodowych. Nieustanny rozwój konstrukcji silników spalinowych wymaga stosowania coraz bardziej wytrzymałych materiałów. Spośród wielu dostępnych metod oddziaływania na właściwości wytrzymałościowe warstwy wierzchniej materiałów stosowanych w budowie silników spalinowych jest implantacja jonowa. W niniejszej pracy przedstawiono przegląd prac związanych z badaniem oddziaływania implantacji jonów różnych pierwiastków na właściwości warstwy wierzchniej materiałów stosowanych w przemyśle motoryzacyjnym. Zwrócono uwagę na wpływ domieszkowania jonów na takie właściwości warstwy wierzchniej jak mikrotwardość, odporność na zużycie tribologiczne, żaroodporność oraz odporność na korozję.

WSTĘP

Dzisiejsze silniki spalinowe chcąc konkurować z napędami elektrycznymi, muszą charakteryzować się dużą sprawnością oraz wydajnością. Konstruktorzy prześcigają się we wprowadzaniu rozwiązań związanych z ciągłym zwiększaniem jednostkowej mocy silnika. Osiąganie coraz większych mocy przy jednoczesnym zmniejszaniu wymiarów silników, wiąże się z koniecznością opracowywania nowych, wytrzymalszych materiałów konstrukcyjnych, jak również ze stosowaniem metod inżynierii powierzchni, pozwalających na zwiększanie wytrzymałości dostępnych materiałów.

Znanych jest wiele metod pozwalających wpływać na wybrane właściwości wytrzymałościowe materiałów, stosowanych do budowy komponentów silnika spalinowego. Pierwszym sposobem poprawy odporności warstwy wierzchniej elementu może być nakładanie różnego rodzaju powłok. W Polsce powszechnie stosowane jest nakładanie powłok galwanicznych. Przykładem takiego procesu może być chromowanie, dzięki niemu uzyskuje się poprawę żaroodporności, czy też odporności na zużycie, co jest ważne na przykład w przypadku konstrukcji pierścieni tłokowych [1]. Chromowanie jest również często używane w przemyśle motoryzacyjnym do tworzenia elementów dekoracyjnych pojazdu, które w skutek chromowania uzyskują wysoki połysk i metaliczny wygląd.

Znane są również metody tworzenia wytrzymałej warstwy wierzchniej już na etapie formowania i wytwarzania elementu. Metody te określane są mianem metod technologicznych. Jest to liczna grupa procesów, których zadaniem jest uzyskanie określonych parametrów warstwy wierzchniej obrabianego elementu. Zaliczyć można do nich: metody mechaniczne np. nagniatanie udarowe, nagniatanie naporowe, czy też skrawanie. Metody cieplno-mechaniczne jak np. natryskiwanie, platerowanie, utwardzanie detonacyjne. Metody cieplne, do których można zaliczyć: hartowanie odpuszczanie, wyżarzanie, ale również napawanie, natapianie czy też stapianie. Wiele elementów silnika spalinowego poddawanych jest różnym procesom technologicznym, których zadaniem jest zwiększenie wytrzymałości danego elementu. Zaliczyć można do nich m.in. hartownie, stosowane w celu poprawy wytrzymałości

czopów wału korbowego, kucie, stosowane w produkcji korbowodów. Najpowszechniej stosowanym procesem technologicznym jest skrawanie, które pozwala uzyskać określony kształt oraz jakość powierzchni obrabianego elementu. Do grupy procesów skrawania zalicza się toczenie, frezowanie, struganie, dłutowanie, szlifowanie, a także polerowanie.

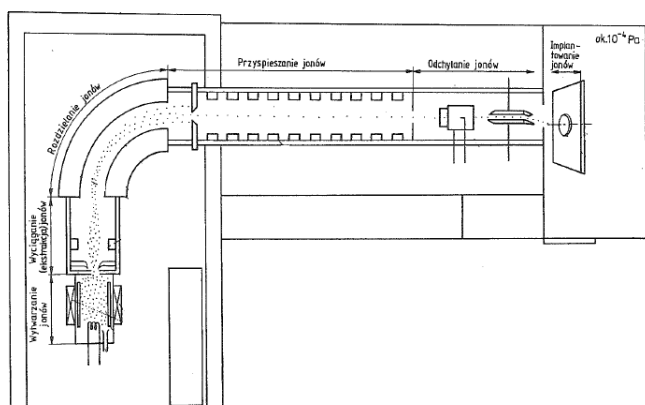
Rzeczywistość fizyki oraz ciągle poszerzanie wiedzy na temat budowy atomu, pozwoliły na zastosowanie metod obróbki warstwy wierzchniej, wykorzystujących prawa fizyki kwantowej. Zalicza się do nich obróbkę laserową, która wykorzystuje wiązkę lasera do oddziaływania na powierzchnię materiału obrabianego. Lasery mogą być wykorzystane do obróbki cieplnej, jak również do cięcia i formowania wyrobów [2]. Przykładem zastosowania obróbki laserowej w przemyśle samochodowym, może być laserowa obróbka powierzchni tulei cylindrowej. Polega ona na wykonywaniu niewielkich zagłębień na powierzchni tulei w jej górnej części, pozwalających na zatrzymanie oleju i zapewnienie smarowania pierścieniom tłokowym.

Metodą fizyczną, pozwalającą modyfikować właściwości warstwy wierzchniej obrabianego elementu jest również implantacja jonowa. Niniejsza praca przedstawia charakterystykę oraz metody implantacji jonów oraz ich wpływ na zmiany właściwości fizycznych i chemicznych materiałów stosowanych w budowie komponentów silników spalinowych i jego osprzętu.

1. CHARAKTERYSTYKA PROCESU IMPLANTACJI JONÓW

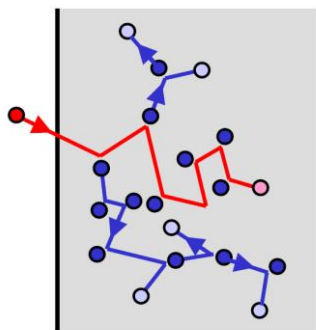
Implantacja jonów zaliczana jest do fizycznych metod kształtowania właściwości warstwy wierzchniej materiałów. Jest to proces polegający na wprowadzaniu atomów dowolnego pierwiastka do przypowierzchniowej warstwy ciała stałego (tarczy). Atomy wnikają w strukturę materiału dzięki dużej energii kinetycznej, którą nabywają w przyspieszającym je polu elektrycznym.

Implantacja jonowa wykonywana jest w urządzeniu określanym mianem implantatora jonów, którego schemat budowy przedstawiony został na rys. 1.



Rys. 1 Schemat implantatora jonów [3]

Atomy wybranego pierwiastka są jonizowane, następnie przemieszczają się w polu magnetycznym, przechodząc przez separator, który oddziela jony implantowane od tych, które dostały się w wiązkę w sposób przypadkowy. Kolejnym etapem jest rozpędzanie jonów do określonej prędkości, przy której osiągną zakładaną energię kinetyczną, formowanie strugi i ostatecznie uderzenie (bombardowanie) powierzchni obrabianego elementu jonami danego pierwiastka. W skutek zderzeń pomiędzy implantowanymi jonami, a atomami w strukturze materiału zachodzą takie zjawiska jak: rozpylenie (trawienie jonowe), wbijanie w głąb próbki atomów z powierzchni metalu, uszkodzenia radiacyjne, mieszanie jonowe oraz dyfuzja. Warunki implantacji dobiera się tak, aby wnikanie implantowanych jonów zdecydowanie dominowało nad pozostałymi procesami. Każdy z implantowanych jonów porusza się według indywidualnej trajektorii, co jest przedstawione na rys. 2



Rys. 2 Schemat toru implantowanego jonu w metalu (kolor czerwony) oraz przemieszczeń atomów tarczy (kolor niebieski) [4].

Technologia implantacji jonowej posiada szereg zalet. Można do nich zaliczyć:

- czystość procesu, która wynika z przeprowadzania go w komorze próżniowej,
- możliwość implantowania dowolnego pierwiastka, w strukturę dowolnego materiału,
- dużą kontrolę procesu, możliwe jest dostosowanie energii implantacji (od kilkunastu keV do kilku GeV) oraz dawki implantowanych jonów,
- brak zmiany wymiarów zewnętrznych obrabianego elementu,
- niska temperatura procesu (poniżej 200°C), która nie wywołuje zmian struktury materiału.

Pomimo wielu zalet, implantacja jonów posiada również pewne wady, takie jak:

- wysokie koszty aparatury,

- niski zasięg implantowanych jonów, w zależności od energii implantacji zawiera się on w granicach $0,1 \pm 10 \mu\text{m}$,
- trudności przy obróbce elementów o skomplikowanym kształcie.

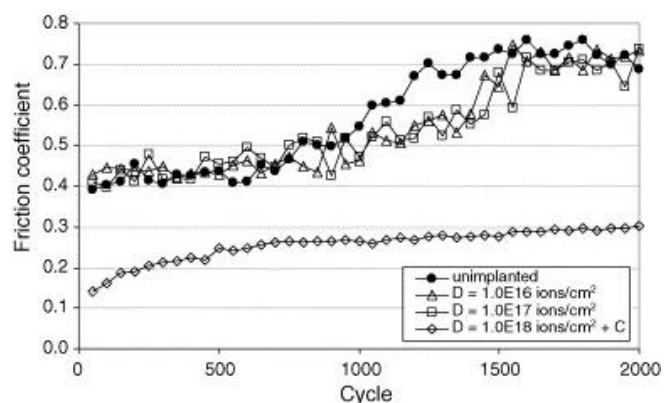
2. ZMIANY WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNYCH I FIZYKO-CHEMICZNYCH WYWOŁANE IMPLANTACJĄ JONÓW

Pomimo występowania poważnych ograniczeń związanych z wykorzystaniem implantacji jonów w przemyśle samochodowym, istnieją komponenty, których właściwości warstwy wierzchniej mogą być z powodzeniem zmieniane poprzez zastosowanie tego rodzaju obróbki.

2.1. Wpływ implantacji jonów na właściwości tribologiczne

W literaturze szeroko opisywany jest wpływ domieszkowania różnego rodzaju pierwiastków na zmiany właściwości tribologicznych takich jak: współczynnik tarcia, czy też zużycie tribologiczne materiałów poddanych obróbce.

Duży wpływ na zmianę współczynnika tarcia ma implantacja jonów azotu. Na Rys. 3 przedstawione są zmiany przebiegu współczynnika tarcia dla stopu tytanu Ti6Al4V. Jest to stop powszechnie wykorzystywany w budowie maszyn, z uwagi na wysoki stosunek wytrzymałości do ciężaru własnego. Stosowany jest m.in. jako materiał konstrukcyjny w wytwarzaniu korbowodów silników spalinowych, czy też zaworów i elementów turbosprężarek.

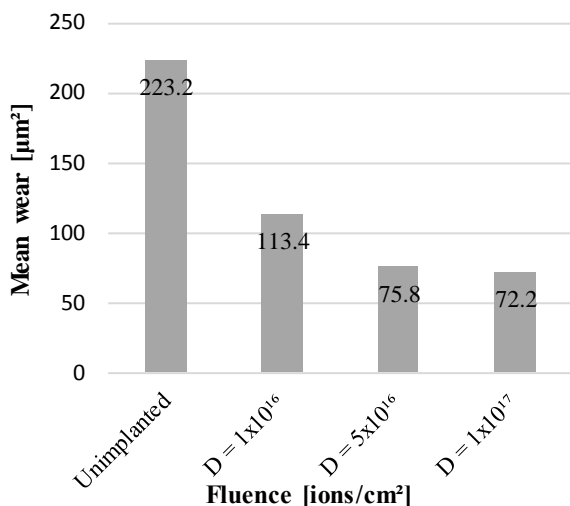


Rys. 3 Przebieg współczynnika tarcia dla próbek ze stopu Ti6Al4V, poddanych implantacji jonami azotu. Badanie wykonywane było w warunkach tarcia technicznie suchego [5].

Analiza przedstawionego wykresu pozwala stwierdzić, że domieszkowanie azotu w strukturę stopu tytanu Ti6Al4V, wpływa na zmniejszenie współczynnika tarcia w warunkach tarcia technicznie suchego. Przy maksymalnej dawce implantowanych jonów współczynnik tarcia był dwukrotnie mniejszy na początku testu, a wraz z jego upływem osiągnął wartość 0,3, gdzie wartość współczynnika tarcia próbki nieimplantowanej wyniosła powyżej 0,7. Spadek współczynnika tarcia ma duże znaczenie w przypadku współpracy par precyzyjnych. Jego zmniejszenie wpływa również na wzrost sprawności mechanicznej mechanizmu. Szacuje się, że w przypadku silnika spalinowego ok. 17% strat mechanicznych związanych jest ze stratami na skutek tarcia, a 6% to tarcie zaworów o prowadnice zaworowe [6]. Zmniejszenie współczynnika tarcia o 50%, może wpłynąć na zwiększenie się sprawności silnika spalinowego.

Poza zmianą współczynnika tarcia ważny jest również spadek zużycia tribologicznego. Zauważany on jest zarówno w przypadku domieszkowania jonów azotu, jak również innych pierwiastków, np. węgla lub tytanu [7-9]. Rysunek 4 przedstawia wpływ implantacji

jonów azotu na zmiany zużycia tribologicznego stopu kobaltu, o oznaczeniu handlowym Stellite 6.



Rys. 4 Średnie zużycie próbek ze stopu kobaltu, poddanych implantacji jonami azotu [10]

Wyniki przedstawione na rys. 4 pokazują, że implantacja jonów azotu znacząco wpływa na zmniejszenie zużycia tribologicznego w warunkach tarcia technicznie suchego. Jest to ważne zwłaszcza w przypadku komponentów silnika, które mogą być narażone na prace przy niedostatecznym smarowaniu.

2.2. Wpływ implantacji jonów na mikrotwardość

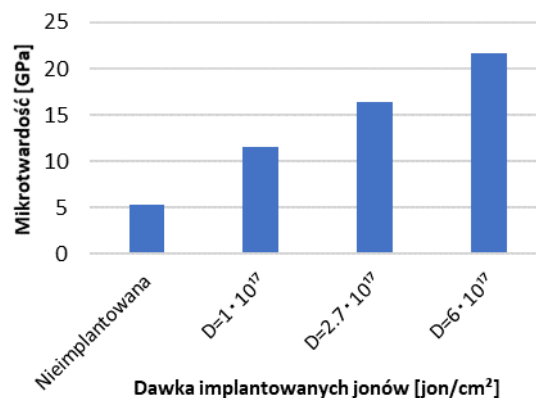
Zastosowanie domieszkowania jonów innych pierwiastków, niż te które tworzą strukturę materiału, powoduje lokalne zmiany fazowe, tworzenie się nowych cząstek, a nawet przemiany prowadzące do amorfizacji [11, 12]. W skutek tych przemian, zmieniają się nie tylko właściwości tribologiczne warstwy wierzchniej, ale również inne właściwości mechaniczne takie jak mikrotwardość.

Wzrost mikrotwardości obrabianego elementu może skutkować zwiększeniem jego odporności na obciążenia mechaniczne, takie jak obciążenia udarowe występujące w przypadku przyłgni zaworowych w silnikach spalinowych. Przyłgni zaworów oraz gniazd zaworowych często pokrywane są stopami kobaltu z uwagi na jego odporność na wysoką temperaturę oraz agresywne środowisko [13]. Autorzy pracy [14] wykazali, że domieszkowanie jonów azotu z energią 65 keV wpływa na zmiany mikrotwardości stopu Stellite 6, co przedstawione zostało w tabeli 1. Różne dawki implantowanych jonów, w różnym stopniu wpływają na mikrotwardość. Wyniki badań wskazują, że największy wzrost uzyskano przy dawce 5·10¹⁶ N⁺/cm².

Tab. 1. Zmiany mikrotwardości stopu Stellite 6 wywołane implantacją jonów azotu [14].

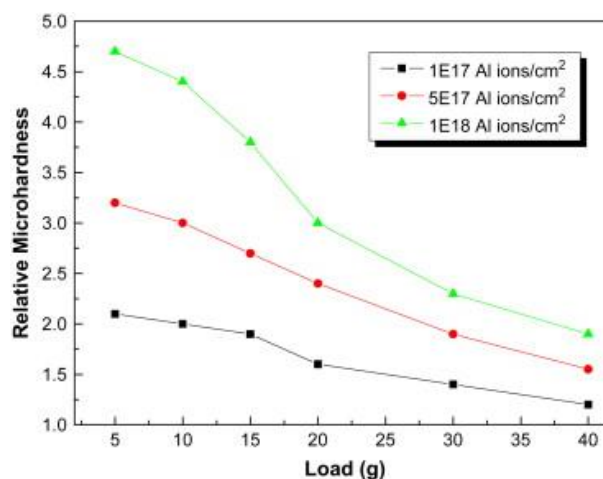
Dawka implantowanych jonów [jon/cm ²]	Średnia wartość HV	Odczylenie standardowe	Zmiana względem próbki nieimplantowanej
1·10 ¹⁶	292.02	64.02	87%
5·10 ¹⁶	405.75	125.33	120%
1·10 ¹⁷	353.13	122.13	105%
nieimplantowana	337.15	43.31	100%

Znaczny wzrost mikrotwardości został zaobserwowany po naswietlaniu stopu Ti6Al4V jonami azotu z energią 90 keV [15]. Wyniki badań przedstawione w pracy pokazują, że przy temperaturze pokojowej mikrotwardość stopu tytanu wzrosła czterokrotnie przy dawce implantacji 6·10¹⁷ N⁺/cm². Wyniki badań przedstawione zostały na rys. 5.



Rys. 5 Zmiany mikrotwardości stopu Ti6Al4V pod wpływem implantacji jonów azotu z energią 90 keV [15].

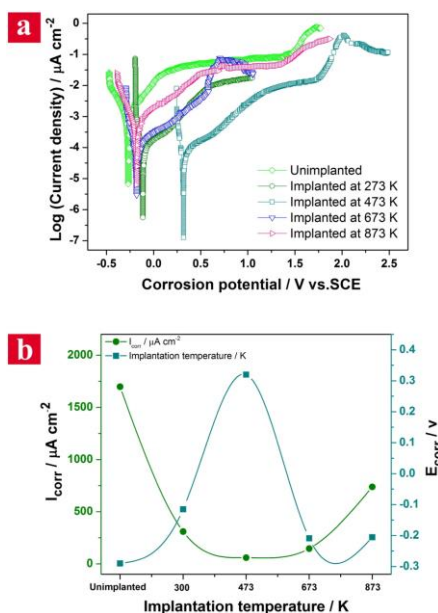
Zwiększenie się mikrotwardości materiału poddanego implantacji jest widoczne nie tylko podczas domieszkowania jonów azotu, ale również innych pierwiastków m.in. węgla, tytanu czy aluminium. Autorzy pracy [16] wykazali wzrost mikrotwardości stopu Ti-AL-Zr poddanego napromieniowaniu jonami aluminium. Przedstawiona na rys. 6 zależność relatywnej wartości mikrotwardości próbki poddanej napromieniowaniu do próbki wzorcowej, wykazuje wzrost mikrotwardości w zależności od dawki implantowanych jonów.



Rys. 6 Relatywny wzrost mikrotwardości stopu Ti-Al-Zr po implantacji jonów aluminium w stosunku do próbki nieimplantowanej [16].

2.3. Wpływ implantacji jonów na odporność korozyjną i żaroodporność

Z uwagi na warunki pracy wielu komponentów silnika spalinowego ważne jest, aby były one odporne na warunki pracy zarówno w agresywnym środowisku, zwiększającym podatność na korozję jak i obecność wysokiej temperatury. Przykładem materiału stosowanego w motoryzacji, który powinien wykazywać się dużą odpornością na korozję wysokotemperaturową jest odmiana tytanu o dominującej fazie γ (TiAl). Materiał ten służy do wykonywania wirników turbosprężarek. Zastosowanie implantacji atomów niobu czy też niobu z chromem w dużym stopniu poprawia odporność tego materiału na korozję wysokotemperaturową [17]. Poprawa odporności na korozję widoczna jest również w skutek implantacji jonów azotu jak i węgla. Wyniki badań zaprezentowane na rys. 7 przedstawiają wyniki badań korozyjnych czystego tytanu po implantacji jonami azotu.



Rys. 7 Potencjokinetyczne krzywe próbek tytanowych implantowanych z różną temperaturą (a) oraz zmiany gęstości prądu korozyjnego i potencjału próbek w odniesieniu do temp. implantacji [18].

PODSUMOWANIE

Przeprowadzona analiza stanu wiedzy pozwala stwierdzić, że odpowiednio dobrane metody wytwarzania warstwy wierzchniej komponentów silnika spalinowego, wpływają na wydłużenie okresu jego zdatności do użycia. Zastosowanie implantacji jonowej jako metody konstytuowania warstwy wierzchniej, pozwala wpływać na szereg wartości takich jak mikrotwardość, odporność na zużycie tribologiczne, żaroodporność i odporność na korozję. Technologia procesu domieszkiwania jonów umożliwia zachowanie wysokiej powtarzalności otrzymywanych właściwości warstwy wierzchniej. Umożliwia to duża kontrola parametrów procesu implantacji, do których należą: energia implantacji, dawka implantowanych jonów oraz temperatura procesu. Brak wpływu implantacji na wymiary obrabianego elementu oraz zachowanie temperatury procesu zbliżonej do temperatury pokojowej (<60°C) pozwalają wykorzystywać ten proces jako finalną metodę obróbki, stosowaną na gotowym wyrobie.

BIBLIOGRAFIA

1. Xu J., Liang H., Totten G., Liu J. *Engine tribology and surface modification technology*, „Inżynieria powierzchni” 2004, nr 4, s. 8-18
2. Burakowski T., Napadłek W., *Ablacja laserowa w tribologii*, „Tribologia” 2009, nr 5, s. 11-24
3. Burakowski T., Wierchoń T., *Inżynieria powierzchni metali* WNT Warszawa, 1995, s. 403
4. Moeller W., *Fundamentals of ion-surface interaction*, Short resume of a lecture held at the Technical University of Dresden, Winter 2003/2004.
5. Budzyński P., Youssef A.A., Sielanko J. *Surface modification of Ti-6Al-4V alloy by nitrogen ion implantation*, „Wear” 2006, nr 261, s. 1271-1276
6. Kennedy M., Hoppe S., Esser J. *Piston Ring Coating Reduces Gasoline Engine Friction* „MTZ worldwide” 2012, nr 73, s. 40-43
7. Pierret C., Maunoury L., Monnet I. i inni *Friction and wear properties modification of Ti-6Al-4V alloy surfaces by implantation of multi-charged carbon ions* „Wear” 2014, nr 319 s. 19-26

8. Tan L., Shaw G., Sridharan K., Crone W.C., *Effects of oxygen ion implantation on wear behavior of NiTi shape memory alloy* „Mechanics of materials” 2005, nr 37, s. 1059-1068
9. Lei M.K., Li P., Yang H.G., Zhu X.M. *Wear and corrosion resistance of Al ion implanted AZ31 magnesium alloy* „Surface and coatings technology” 2007, nr 201, s. 5182-5185
10. Budzyński P., Kamiński M., Wiertel M., Pysznik K., Drożdziel A. *Mechanical properties of the Stellite 6 cobalt alloy implanted with nitrogen ions* „Acta Physica Polonica A” 2017, nr 132 s. 203-205
11. Feng K., Wang Y., Li Z., Chu P.K., *Characterization of carbon ion implantation induced graded microstructure and phase transformation in stainless steel* „Material characterization” 2015, nr 106, s. 11-19
12. Sadi S., Paulenova A., Loveland P.R. i inni *Surface morphology and phase stability of titanium foils irradiated with $^{136}\text{MeV } ^{136}\text{Xe}$* „Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. B” 2014, nr 328, s. 78-83
13. Adamiec P., Dziubiński J., *Wytwarzanie i właściwości warstw wierzchnich elementów maszyn transportowych*, WPS, Gliwice 2005, s. 90-91
14. Budzyński P., Kamiński M., Pałka K., Drożdziel A., Wiertel M. *The influence of nitrogen ion implantation on microhardness of the Stellite 6 alloy*, „IOP Conference Series: Mater. Sci. and Eng.” 2016, nr 148
15. Vlcak P., Cerny F., Drahoukupil J., Sepitka J., Tolde Z., *The microstructure and surface hardness of Ti6Al4V alloy implanted with nitrogen ions at an elevated temperature* „Journal of Alloys and Compounds” 2015, nr 620, s. 48-54
16. Liu Y.Z., Zu X.T., Wang L., Qiu S.Y. *Role of aluminium ion implantation on microstructure, microhardness and corrosion properties of titanium alloy* „Vacuum” 2008, nr 83, s. 444-447
17. Haanappel V. A. C., Stroosnijder M. F., *Ion implantation technique as research tool for improving oxidation behaviour of TiAl based intermetallic alloys* „Surface Engineering” 1999, nr 15, s. 119-125.
18. Oskooie M.S., Motlagh M.S., Aghajani H. *Surface properties and mechanism of corrosion resistance enhanced in a high temperature nitrogen ion implanted medical grade Ti* „Surface and coatings technology” 2016, nr 291, s. 356-364

ION implantation as a method of surface constitution of combustion engines components

The combustion engine is currently one of the most commonly used propulsion units in vehicles. The continuous development of internal combustion engines requires more and more durable materials. Among the many available methods of influence on the strength properties of the materials surface layer, used in the construction of internal combustion engines are ion implantation. In this paper we present a review of work related to the study of influence of ion implantation of different elements on the surface properties of materials used in the automotive industry. Attention has been paid to the influence of the ionic dopers on the properties of the surface layer such as microhardness, tribological wear resistance, heat resistance and corrosion resistance.

Autorzy:

mgr inż. **Mariusz Kamiński** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Samochodowych,
 e-mail: mariusz.kaminski@pollub.pl

dr hab. inż. **Piotr Budzyński** – Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Pojazdów Samochodowych,
 e-mail: p. budzynski@pollub.pl