

## KSZTAŁTOWANIE POWIERZCHNI WEWNĘTRZNYCH CYLINDRÓW TECHNOLOGIĄ NATRYSKIWANIA CIEPLNEGO METALI

KURZYNA Zbigniew, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska  
LEJDA Kazimierz, Prof. dr hab. Inż, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, Polska

## ФОРМУВАННЯ ВНУТРІШНІХ ПОВЕРХОНЬ ЦИЛІНДРІВ ТЕХНОЛОГІЄЮ ТЕПЛОГО НАПИЛЕННЯ МЕТАЛУ

КУЖИНА Збігнєв, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща  
ЛЕЙДА Казімеж, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Жешув, Польща

## FORMATION OF INTERNAL SURFACES CYLINDERS TECHNOLOGY OF THERMAL SPRAYING METAL

KURZYNA Zbigniew, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland  
LEJDA Kazimierz, Prof. DSc, Rzeszow University of Technology, Rzeszow, Poland

**Wstęp.** Technologia tworzenia powłok przez natryskiwanie cieplne metali na podłoże znana jest już od ponad 100 lat. Przez odpowiedni dobór natryskiwanego materiału daje ona możliwości kształtowania pożądanych właściwości powierzchni. W zależności od specyfiki silnika powłoki mogą wykazywać zwiększoną odporność na zużycie ściernie lub korozję. Można również kształtować temperaturę cylindra przez dobór materiałów o różnej przewodności cieplnej. Z uwagi na to, że powłoki natryskiwane mają małą grubość rzędu 160...240  $\mu\text{m}$  [4], a po honowaniu 100...180  $\mu\text{m}$  [2] pozytywnie wpływają na masę silnika przy jednocześnie niskich kosztach materiałowych. Pomimo swoich zalet nie jest to jednak technologia stosowana powszechnie w produkcji tłokowych silników spalinowych. Wpływa na to głównie bardziej złożony proces produkcji wymagający dodatkowych operacji technologicznych i nowych urządzeń. W ostatnich latach technologia natryskiwania cieplnego została wdrożona przez niektóre koncerny samochodowe do seryjnej produkcji cylindrów zwłaszcza w blokach silnikowych ze stopów lekkich.

**Charakterystyka metod natryskiwania cieplnego metali.** Natryskiwanie cieplne metali polega na stopieniu i rozpyleniu materiału powłoki na specjalnie przygotowane podłoże. Rozpędzone przez gaz do odpowiedniej prędkości, roztopione, drobne cząsteczki uderzają w podłoże tworząc połączenia mechaniczne lub adhezyjne, a niekiedy dyfuzyjne. Powłoka ma strukturę warstwową, niejednorodną i porowatą i może zawierać tlenki materiałów natrykiwanych powstałych na powierzchni cząsteczek w czasie ich transportu od palnika do podłoża. W zależności od sposobu topienia materiału na powłoki, natryskiwanie cieplne dzieli się na: płomieniowe, łukowe i plazmowe.

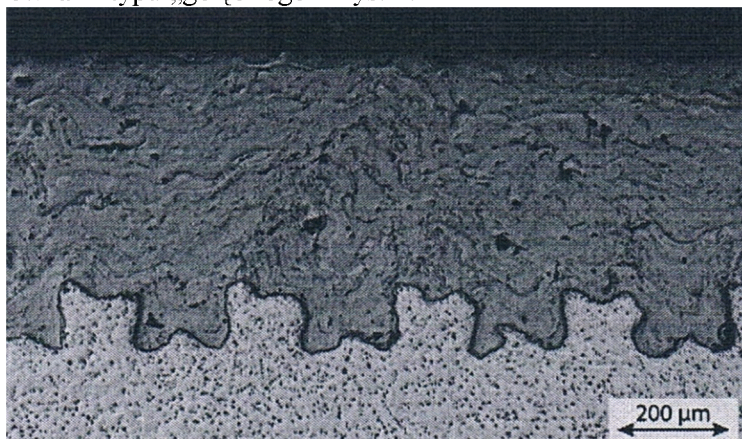
Źródłem ciepła w natryskiwaniu płomieniowym jest płomień gazowy powstający najczęściej ze spalania acetylenu, którego temperatura wynosi około 3100 °C. Na wytrzymałość połączenia powłoki z podłożem i jej porowatość duży wpływ ma prędkość natrykiwanych cząstek materiału. Ze względu na prędkość cząstek rozróżnia się natryskiwanie płomieniowe poddźwiękowe i naddźwiękowe. Cząsteczki stopionego materiału o średnicy w zakresie 15...200  $\mu\text{m}$  uzyskują odpowiednio prędkość 100...350 m/s dla natrykiwania poddźwiękowego i 400...1200 m/s dla natrykiwania naddźwiękowego. Porowatość powłoki przy natrykiwaniu płomieniowym z dużą prędkością i wysokim ciśnieniu jest bliska zero, natomiast dla natrykiwania poddźwiękowego na zimno dochodzi do 12 %. [10]

W natryskiwaniu łukowym dwa druty z litego metalu lub proszkowe topione są w łuku elektrycznym o temperaturze 4200...5000 °C. Jednocześnie strumień sprężonego powietrza pod ciśnieniem około 2...7 bar i z wydajnością 2...5 m<sup>3</sup>/min rozpyla roztopiony metal i transportuje go z prędkością około 150...200 m/s na podłoże. Ze względu na wysoką temperaturę rozpylonych cząstek możliwe jest metaliczne połączenie z podłożem o charakterze dyfuzyjnym dzięki czemu uzyskuje się dobrą przyczepność (powyżej 30 MPa). Grubość powłoki natrykiwanej łukowo wynosi około 0,2...2 mm, porowatość około 5...10%, zawartość tlenków do 10 % [10]. Największy wpływ na porowatość powłoki ma ciśnienie i wydajność gazu jak również odległość palnika od powierzchni natrykiwanej. Małe wymiary rozpylonych cząstek ograniczają nagrzewanie podłoża, którego temperatura nie przekracza 100 °C. Natryskiwanie łukowe jest najtańszym procesem natrykiwania cieplnego.

W procesie natryskiwania plazmowego materiał jest topiony w łuku plazmowym, którego temperatura wynosi 8000...20000 °C. Gazami plazmotwórczymi są argon i azot, a pomocniczymi wodór i hel. Roztopione cząsteczki są natryskiwane na podłoże z prędkością 100...600 m/s wytwarzając połączenie mechaniczne, adhezyjne lub metaliczne dyfuzyjne. Natryskiwanie plazmowe umożliwia uzyskiwanie powłok, które jednocześnie są odporne na ścieranie, korozję, wysokie temperatury i udary cieplne.

Trwają również prace nad natryskiwaniem hybrydowym, gdzie w procesie natryskiwania, oprócz rodzajów wymienionych wyżej, stosuje się technologię laserową i indukcję prądami wysokiej częstotliwości. [6]

**Uwarunkowania techniczne technologii natryskiwania cieplnego gładzi cylindrowej.** Powłokę wewnętrzną cylindra powinna cechować odporność na zużycie ściernie i korozję, dobre właściwości smarne, wytrzymałość na zmienne obciążenia mechaniczne i cieplne. Uzyskanie wymaganych właściwości i trwałości powłoki natryskiwanej cieplnie na powierzchnię wewnętrzną tulei cylindrowej wymaga starannego opracowania zagadnień technicznych związanych z przygotowaniem powierzchni podłoża, przygotowaniem materiału natrykiwanego, wyborem technologii natryskiwania i ustaleniem jej optymalnych parametrów jak również parametrów obróbki wykańczającej. Przygotowanie podłoża ma zasadniczy wpływ na przyczepność powłoki. Podłoże musi posiadać odpowiednią chropowatość powierzchni aby natrykiwane cząstki mogły łatwo się zaklinowywać, musi być czysta, gdyż wszelki zanieczyszczenia i warstwy tlenkowe zmniejszają przyczepność. Odpowiednie podłoże wykonuje się najczęściej przez obróbkę mechaniczną: skórowanie, gwintowanie, śrutowanie. Autorzy [3] badali wytrzymałość wiązania powłoki natrykiwanej stali o zawartości węgla 0,82 % na podłożu aluminiowe. Dla podłoża skórowanego uzyskano wytrzymałość wiązania 40 MPa, blisko 50 MPa dla podłoża oczyszczonego strumieniem wody pod wysokim ciśnieniem i 58 MPa dla podłoża z rowkami typu „gołębi ogon” rys. 1.



Rys. 1 Połączenie powłoki z podłożem typu „gołębi ogon” [3]

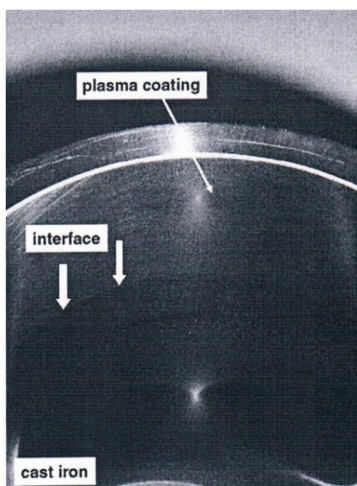
Oprócz obróbki mechanicznej stosuje się warstwy pośrednie zwiększające przyczepność. Najczęściej używa się w tym celu kompozytów metalicznych aluminium – nikiel. Metale te reagują ze sobą w czasie nagrzewania wydzielając przy tym duże ilości ciepła, dzięki czemu nagrzewają materiał podłoża i umożliwiają powstanie mikrospoin.

Materiał i parametry natryskiwania należy dobrać tak, aby otrzymać strukturę jednorodną, bez mikropęknięć i o odpowiedniej porowatości. Według [4] idealna wartość porowatości wynosi 2 %. Przy natryskiwaniu powłok stalowych należy unikać powstawania tlenków  $Fe_2O_3$ , które są materiałem ściernym. Przy wysokich temperaturach natryskiwania może dochodzić do wypalania niektórych składników materiału. Podczas natryskiwania łukowego stali ubywa do 45 % węgla i do 50 % krzemu i manganu. [7]

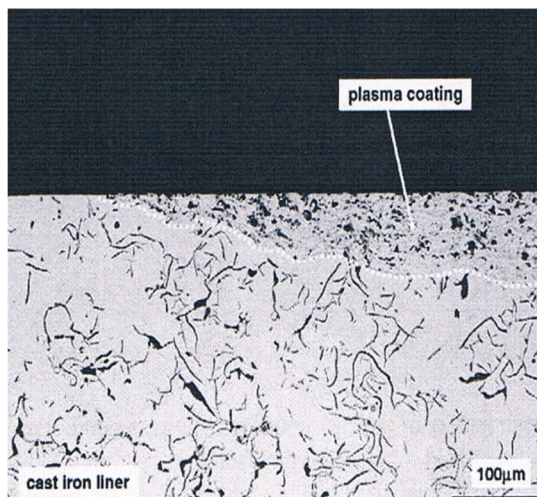
Otwory cylindrów po operacji natryskiwania cieplnego podlegają obróbce wykańczającej, dlatego materiał powłoki powinien odznaczać się dobrymi właściwościami obróbkowymi. Podczas honowania zachodzi proces mechanicznego odsłaniania porów w powłoce jak również wrywania cząsteczek z powierzchni, szczególnie przy zbyt kruchej powłoce. Powoduje to nadmierne zwiększenie pojemności olejowej gładzi cylindra. Należy również brać pod uwagę wpływ powłoki na przewodność cieplną ścianki cylindra i rozszerzalność cieplną powłoki, która nie powinna się zbytnio różnić od rozszerzalności cieplnej podłoża.

**Gładzie cylindrów z powłokami natrykiwanymi cieplnie w badaniach i produkcji seryjnej.** Formowanie gładzi cylindrów za pomocą natryskiwania cieplnego metali osiągnęło już poziom technologiczny umożliwiający zastosowanie tej metody w produkcji seryjnej. Ze względu na złożoność procesu i wpływ wielu czynników na finalne właściwości cylindrów nadal prowadzone są prace badawcze w tym zakresie.

Autorzy [1] opisują wyniki testów porównawczych czterocylindrowych silników wysokoprężnych wyposażonych w standardowe żeliwne tuleje cylindrowe i powlekane tuleje cylindrowe. Powłoki były napyłone plazmowo materiałem opracowanym przez Sulzer Metco. Wyniki pomiarów po 300 godzinnych testach wykazują znaczne obniżenie zużycia oleju, redukcję przedmuchu spalin do skrzyni korbowej o około 25 %. Zużycie tulei cylindrowej zostało obniżone z 1,2 nm/h do 0,67 nm/h. Postępujące ograniczenia emisji szczególnie tlenków azotu jest powodem stosowania wysokich stopni recyrkulacji spalin. Pogarsza to jednak warunki spalania i powoduje zwiększenie ilości cząstek twardych i sadzy. Sadza powstaje w wyniku pirolizy paliwa ciekłego wtrysniętego do obszarów o wysokiej temperaturze i lokalnym niedoborze tlenu. Cząstki te w połączeniu z wysokim ciśnieniem prowadzą do szybkiego zużycia tulei w okolicach GMP. Firma Sulzer Metco opracowała proces powlekania tylko górnej części tulei cylindrowej. Rys. 2 przedstawia wewnętrzną powierzchnię tulei, a rys. 3 mikrostrukturę żeliwnej tulei cylindrowej z płynnym przejściem napyłonej warstwy.



Rys. 2 Gładź cylindrowa tulei [1]



Rys. 3 Mikrostruktura tulei żeliwnej z napyłoną warstwą [1]

Honowanie powierzchni złożonej z różnych materiałów różniących się twardością i mikrostrukturą wymagało opracowania nowego procesu gładzenia hybrydowego. Autorzy przewidują zastosowanie częściowej powłoki szczególnie w silnikach, gdzie odporność na zużycie jest istotnym czynnikiem.

Autorzy [3] badali wpływ ziarnistości materiału i zawartości boru w otulinie stalowej na pojemność olejową gładzi uzyskaną po honowaniu. Powłoki natryskiwane plazmowo z proszku gruboziarnistego (wielkość ziaren około 350 µm) w otulinie o wysokiej zawartości boru (około 5 %) wykazały się dużą liczbą mikropęknięć. Ze względu na kruchość materiału wiele cząstek zostało w czasie honowania wyrwane z powierzchni powodując nadmierny wzrost pojemności olejowej cylindra. Przy mniejszej wielkości ziaren (około 45...180 µm) i mniejszej zawartości boru (1,9 %) w otulinie uzyskano powłokę bez mikropęknięć i o odpowiedniej pojemności olejowej.

Autorzy [5] badali odporność na zużycie i korozję oraz sztywność bloku cylindrowego ze stopów aluminium z napyłoną powłoką cylindra. Opracowano i przebadano nowy proszek natryskiwany plazmowo.

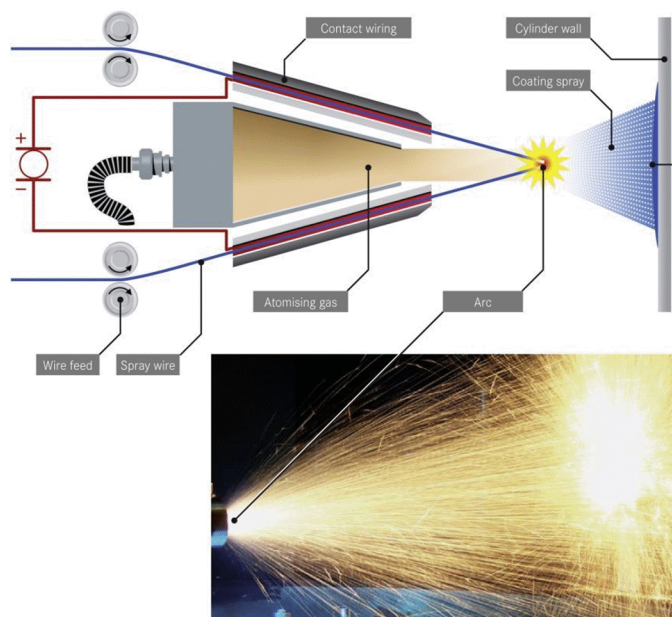
Tabela 1 przedstawia masowy skład chemiczny proszku.

Masowy skład chemiczny proszku [%]										
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu	V	B	Fe
3,10	2,89	0,08	0,004	0,004	8,95	2,46	4,80	0,74	0,075	reszta

Tabela 1 Masowy skład chemiczny proszku do natryskiwania plazmowego [5]

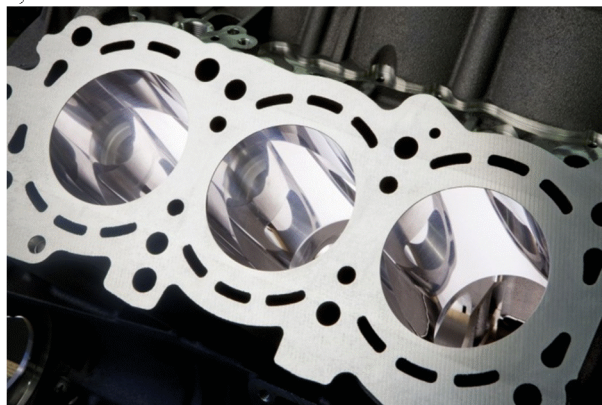
Powłoka z nowego proszku wykazała głębokość maksymalnego zużycia o połowę niższą w porównaniu z seryjnymi tulejami. Odporność na korozję oceniono przez pomiar ubytku masy po zanurzeniu bloków silnika w 20 % roztworze kwasu siarkowego z wodą na czas 95 h. Utrata masy powłoki napyłonej nowym proszkiem była około 2 % podczas gdy dla seryjnych materiałów ubytek ten wynosił 8...9 %. Sztywność bloku cylindrów z napyłoną powłoką jest równa lub większa niż cylindrów żeliwnych.

Firma Mercedes – Benz opracowała i wprowadziła do seryjnej produkcji technologię łukowego natryskiwania ciepłego gładzi cylindra. Technologia ta pod nazwą „NANOSLIDE” z powodzeniem stosowana jest od 2006 r. w silnikach benzynowych V8 o pojemności 6,3 litra i jest wdrażana w wysokoprężnych silnikach V6 o pojemności 3 litrów. Na rys. 4 przedstawiono schemat natryskiwania łukowego powierzchni cylindra.



Rys. 4 Schemat natryskiwania łukowego powierzchni cylindra [8]

Druty ze stopu żelaza z węglem są topione w łuku elektrycznym, a stopiony materiał jest rozpylany na ściance cylindra. Powłoka jest następnie poddawana gładzeniu, którego efektem jest bardzo gładka, lustrzana powierzchnia. W trakcie procesu gładzenia odsłaniane są pory w materiale powłoki stanowiące mikrozbiorniki oleju. Wynikiem tego jest znaczne zredukowanie tarcia (do 50 % w porównaniu do tulei z żeliwa szarego), co skutkuje zmniejszeniem o około 3 % zużycia paliwa. Grubość powłoki po obróbce wykańczającej wynosi 0,1...0,15 mm.



Rys. 5 Powierzchnia cylindrów po obróbce wykańczającej [8]

Technologię natryskiwania ciepłego łukiem elektrycznym stosuje również BMW w sześciocylindrowych silnikach samochodów sportowych BMW M3 sedan oraz BMW M4 Coupe.

W tabeli 2 przedstawiono listę silników produkowanych przemysłowo z powłokami cylindra natryskiwanymi plazmowo.

silnik	liczba cylindrów	zastosowanie
<b>silniki benzynowe</b>		
Lupo FSI 1.4 L	4	VW Lupo
Swiss Auto Biland	2	wyścigi Go-Kart
Bugatti W 16	16	Bugatti
V 10	10	wyścigi Formuła 1
V 8	8	wyścigi Formuła 2
V 4	4	wyścigi motocyklowe
<b>silniki wysokoprężne</b>		
V 10 TDI (VW)	10	Touareg, Phaeton
L 5 EA 115 (VW)	5	Touareg, Van T 5

Tabela 2 Silniki z powłoką cylindrów natryskiwaną plazmowo [4]

**Podsumowanie.** Rosnące wymagania z zakresu toksyczności spalin, zużycia paliwa i trwałości silników zmuszają konstruktorów do wdrażania, znanych wcześniej, ale ze względów ekonomicznych i technologicznych nie wykorzystywanych, metod wytwarzania. Jedną z nich jest natryskiwanie cieplne powłok metalowych na powierzchnię wewnętrzną cylindra. Wykorzystuje się ją głównie w cylindrach silników z kadłubem ze stopów lekkich stosowanych w pojazdach ekskluzywnych jak również w silnikach przeznaczonych do sportów motorowych. O złożoności procesu natryskiwania cieplnego gładzi cylindra niech świadczy fakt, że technologię „NANOSLIDE” opracowaną przez Mercedes – Benz chroni ponad 40 patentów. Pomimo tego, że firma Mercedes – Benz wykorzystuje technologię natryskiwania cieplnego gładzi cylindrów w produkcji seryjnej silników, to w dalszym ciągu stosuje równolegle znane wcześniej technologie. W nowych silnikach benzynowych V6 i V8 z kadłubami ze stopów aluminium stosuje wciskane tuleje żeliwne (silnik M276) lub tuleje ze stopu aluminium i krzemu (silnik M278). Czterocylindrowy silnik wysokoprężny OM651 ma natomiast kadłub odlewany z żeliwa szarego. W dalszym ciągu głównym materiałem na kadłuby silnika jest żeliwo. Przykładami mogą być: nowy dwunastocylindrowy silnik wysokoprężny Audi V12TDI, którego kadłub wykonano z żeliwa z grafitem wermikularnym, czy trzycylindrowy jednolitrowy silnik benzynowy Forda. W seryjnej produkcji silników coraz częściej wprowadza się kadłuby jednolite, gdzie gładź cylindra wykonana jest bezpośrednio w bloku silnika. Upraszcza to konstrukcję, a przy zastosowaniu cienkościennych odlewów z wysokogatunkowego żeliwa, kadłub taki ma masę porównywalną do kadłuba aluminiowego [9].

Technologia formowania gładzi cylindrowej tłokowych silników spalinowych przez natryskiwanie cieplne metali jest technologią o dużych możliwościach kształtowania właściwości gładzi. Jednak ze względu na koszty i uwarunkowania techniczne nie przewiduje się w najbliższym czasie masowego jej zastosowania w produkcji seryjnej silników.

#### LITERATURA

- [1] Peter Ernst, Gérard Barbezat: Thermal spray applications In Powertrain contribute to the saving of energy and material resources. Surface & Coatings Technology. SCT-14188, No of Pages 4 (2008).
- [2] Narendra B. Dahotre, S. Nayak: Nanocoatings for engine application. Surface & Coatings Technology 194 (2005) 58 67.
- [3] K. Bobzin, F. Ernst, K. Richardt, T. Schlaefler, C. Verpoort, G. Flores: Thermal spraying of cylinder bores with the Plasma Transferred Wire Arc process. Surface & Coatings Technology 202 (2008) 4438 4443.
- [4] Gérard Barbezat: Advanced thermal spray technology and coating for lightweight engine blocks for the automotive industry. Surface & Coatings Technology 200 (2005) 1990 1993.
- [5] Susumu Uozato, Kazuhiro Nakata, Masao Ushio: Evaluation of ferrous powder thermal spray coatings on diesel engine cylinder bores. Surface & Coatings Technology 200 (2005) 2580 2586.
- [6] Szulc Tomasz: Nowe technologie natryskiwania termicznego. [www.e-autonaprawa.pl/artykuly/1808/nowe-technologie-natryskiwania-termicznego.html](http://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/1808/nowe-technologie-natryskiwania-termicznego.html)
- [7] Szulc Tomasz: Natryskiwanie termiczne. [www.e-autonaprawa.pl/artykuly/](http://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/)
- [8] NANOSLIDE engine technology. [WWW.mercedesclass.net/safety-2/nanoslide-enginetechnology/](http://WWW.mercedesclass.net/safety-2/nanoslide-enginetechnology/)
- [9] Idzior Marek: Rozwój samochodowych silników spalinowych w aspekcie metod ich wytwarzania. Silniki Spalinowe 1/2006 9124).
- [10] Klimpel Andrzej: Napawanie i natryskiwanie cieplne technologie. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne Warszawa 2000.

## STRESZCZENIE

KURZYNA Zbigniew. Kształtowanie powierzchni wewnętrznych cylindrów technologią natryskiwania cieplnego metali/KURZYNA Zbigniew, LEJDA Kazimierz // Wisnyk Narodowego Uniwersytetu Transportu. – K. : NUT, 2014. – № 30.

Artykuł zawiera krótki opis metod natryskiwania cieplnego metali i ich wpływ na właściwości otrzymywanych powłok. Przedstawiono główne problemy związane z zastosowaniem tej technologii do wykonywania gładzi cylindrów, pokazano wyniki niektórych prac badawczych i efekty przemysłowego zastosowania.

## РЕФЕРАТ

КУЖИНА Збігнєв. Формування внутрішніх поверхонь циліндрів технологією теплового напилення металу / КУЖИНА Збігнєв, ЛЕЙДА Казімеж // Вісник Національного транспортного університету. – К.: НТУ, 2014. - Вип. 30.

Стаття містить короткий опис способів теплового напилення металу та їх вплив на властивості отриманих покриттів. Представлено основні проблеми, пов'язані з застосуванням цієї технології щодо забезпечення гладкості циліндрів, подано результати деяких дослідних робіт і ефекти промислового застосування.

## SUMMARY

KURZYNA Zbigniew. Formation of internal surfaces cylinders technology of thermal spraying metal / KURZYNA Zbigniew, LEJDA Kazimierz // Visnyk of the National Transport University. - K.: NTU, 2014. - №30.

The article provides a brief description of the methods of thermal spraying of metal and their influence on the properties of the coating. Are the main problems associated with the use of this technology to ensure the smooth cylinder contains results of some research and the effects of industrial applications.

## AUTORZY:

KURZYNA Zbigniew, Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Rzeszów, Polska

LEJDA Kazimierz, Prof. dr hab. inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Silników Spalinowych i Transportu, Al. Powstańców Warszawy 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959,Rzeszów, Polska

## АВТОРИ:

КУЖИНА Збігнєв, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згорання і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959, Жешув, Польща

ЛЕЙДА Казімеж, Професор, Доктор габілітований, Жешовська Політехніка, Кафедра двигунів внутрішнього згорання і транспорту, Бульвар Повстанців Варшави 12, tel.: +48 17 865 1100,35-959, Жешув, Польща

## AUTHORS:

KURZYNA Zbigniew, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

LEJDA Kazimierz, Rzeszow University of Technology, Department of Internal Combustion Engines and Transport, Warsaw Insurgents Boulevard 12, tel.: +48 17 865 1100, 35-959, Rzeszow, Poland

## РЕЦЕНЗЕНТИ:

Гутаревич Ю.Ф., доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, завідувач кафедри двигунів і теплотехніки, Київ, Україна.

Левківський О.П., доктор технічних наук, професор, Національний Транспортний Університет, професор кафедри виробництва, ремонту та матеріалознавства, Київ, Україна.

## REVIEWERS:

Gutarevych Y.F, Doctor of Sciences, Professor, National Transport University, Head of Department of Engines and Heating Engineering, Kyiv, Ukraine.

Levkivskiy O.P, Doctor of Sciences, Professor, National Transport University, Professor of Department of Manufacturing, Repair and Materials Engineering, Kyiv, Ukraine.