

I Krajowa Konferencja Naukowa
Szybkie prototypowanie
Modelowanie - Wytwarzanie - Pomiary
 Rzeszów - Pstrągowa, 16 - 18 września 2015



Organizatorzy:



CENTRUM NAUKOWO TECHNICZNE

KLASTER SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA
RAPIDROM

Zapewnienie jakości w produkcji łopatek turbin. Optyczna metrologia 3D w przemyśle lotniczym

Quality assurance of turbine blades. Optical 3D metrology in the aerospace industry

DANIEL GROSSMANN
 ANGELIKA HOFER
 DARIUSZ BRZozowski
 MICHAŁ WIECZOROWSKI
 PAWEŁ ZIĘTKIEWICZ*

DOI:10.17814/mechanik.2015.12.561

STRESZCZENIE: Łopatkę turbin są bardzo wyspecjalizowanymi przedmiotami. Wydajny film chłodzący zależy zarówno od wierconych mikro otworów, jak i przygotowania krawędzi łopatek oraz pokryć determinujących żywotność. W artykule przedstawiono rozwiązanie metrologiczne wpisujące się w koncepcję all-in-one, oferowane przez Aliconę i zapewniające producentom łopatek turbin oczekiwaną przez nich weryfikację spełnienia kryteriów jakościowych.

SŁOWA KLUCZOWE: pomiary, łopatkę turbin, cechy geometryczne, nierówności powierzchni

ABSTRACT: Turbine blades are highly specialized components. Efficient film cooling depends on micro drill holes, the blades' edge preparation influences their efficiency, and their coating determines service life. Alicona provides manufacturers of turbine blades with an all-in-one metrology solution for quality assurance

KEYWORDS: measurement, turbine blades, geometric features, surface asperities

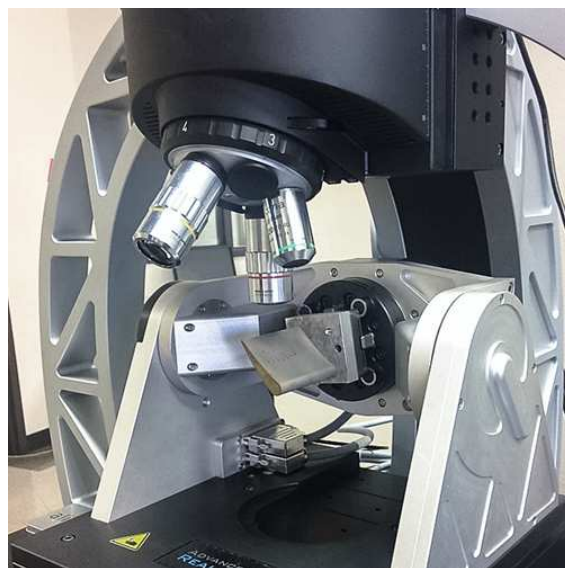
Wprowadzenie

Ocena dokładności geometrycznej jest jednym z podstawowych sposobów weryfikacji poprawności procesu technologicznego. Powinna być przy tym realizowana

*Daniel Grossmann, Alicona GmbH; Angelika Hofer, Alicona GmbH; mgr inż. Dariusz Brzozowski, ITA, db@ita-polska.com.pl; prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski, Politechnika Poznańska, michael.wieczorowski@put.poznan.pl; mgr inż. Paweł Ziętkiewicz, ITA, pzi@ita-polska.com.pl

z zastosowaniem odpowiednich narzędzi i metod pomiarowych, dostosowanych m.in. do kształtu wyrobu, jak również do materiału, z którego został wykonany [1].

W miarę jak rosną wymagania stawiane łopatkę turbin, zwiększa się również złożoność ich geometrii. Wiąże się to nie tylko z bardziej złożonym procesem wytwarzania, ale również samo w sobie staje się nowym wyzwaniem dla technologii pomiarowych stosowanych w kontroli jakości.



Rys. 1. Pomiar łopatek turbin na InfiniteFocus

Różne cechy geometryczne wymagają aby dokonywać ich inspekcji w warunkach automatycznych, bardzo szybko, a z drugiej strony z bardzo wysoką rozdzielczością i identyfikowalnością. Z tego powodu, wiodący producent łożatek turbin z pełnym zaufaniem odnoszą się do technologii pomiarowej Alicony. Optyczne urządzenie pomiarowe 3D o bardzo wysokiej rozdzielczości InfiniteFocus stosowane jest do inspekcji otworów chłodzących, geometrii krawędzi łożatek turbin oraz efektów pokrywania ich powierzchni (rys. 1). Bazuje ono na technologii łączącej wszystkie funkcje współrzędnościowej maszyny pomiarowej (powszechnie stosowanej do pomiaru m.in. łożatek) i przyrządu do pomiaru chropowatości powierzchni w jednej głowicy zbierającej dane z mierzonej powierzchni. W ten sposób, jednym systemem pomiarowym i w jednym podejściu użytkownik może zmierzyć zarówno geometrię w skali makro, jak i w skali mikro (nierówności powierzchni) w odróżnieniu od innych technik pomiarowych [2, 3]. Dane odnośnie łożatki uzyskane na drodze analitycznej pozwalają zaprojektować jej nominalną geometrię, do której należy dążyć w procesie wytwórczym i której parametry trzeba kontrolować na poszczególnych etapach procesu technologicznego [4].

Analiza nierówności powierzchni, często powiązana z analizą kształtu w skali mikro należy do najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin metrologii długości i kąta. Istnieje szereg metod zbierania współrzędnych punktów z powierzchni w skali nano i mikro, a mimo to ciągle pojawiają się nowe [5, 6]. Jest to spowodowane faktem, że z jednej strony powierzchnie, z którymi mamy do czynienia w technice, są w większości skomplikowane i występują na nich nierówności o bardzo szerokim zakresie wysokości, rozłożone w różny sposób, a z drugiej w naturze człowieka jest ciągle poszukiwanie coraz szybszych sposobów uzyskiwania informacji, również pomiarowych. Przyrządy do analizy nierówności powierzchni pracują w oparciu o dwie zasadnicze grupy metod: skaningowe i powierzchniowe. Metody skaningowe są wykorzystywane znacznie częściej. Do tej grupy należą dwa rodzaje przyrządów: profilowe – zbierające dane na podstawie punktów rozmieszczonych według linii oraz obrazowe – na podstawie obrazów zbieranych z różnych położeń (rys. 2). Wśród tej drugiej rodziny znajduje się mikroskopia różnicowania ogniskowego, której poświęcono jest niniejszy artykuł.



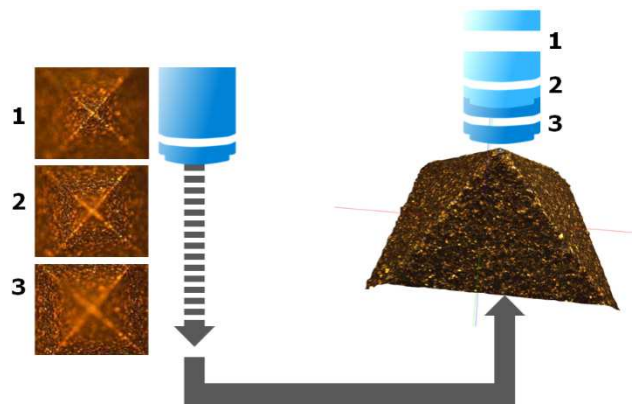
Rys. 2. Podstawowa klasyfikacja metod oceny nierówności powierzchni [7]

Mikroskopia różnicowanie ogniskowego

Mikroskopia różnicowania ogniskowego (focusvariation) jest optyczną, powierzchniową techniką pomiarową wykorzystywaną do inspekcji struktur na powierzchni w skali mikro oraz geometrii w skali makro. Łączy ona funkcjonalność pomiaru chropowatości powierzchni i współrzędnościowej techniki pomiarowej. Pomiary za pomocą tej technologii są identyfikowalne, powtarzalne i pozwalają na uzyskanie rozdzielczości pionowej na poziomie 10 nm, także na przedmiotach o różnej refleksyjności oraz takich, na których kąt pochylecia zboczy sięga 87°. Technologia ta znalazła się w najnowszym projekcie normy EN ISO 25178

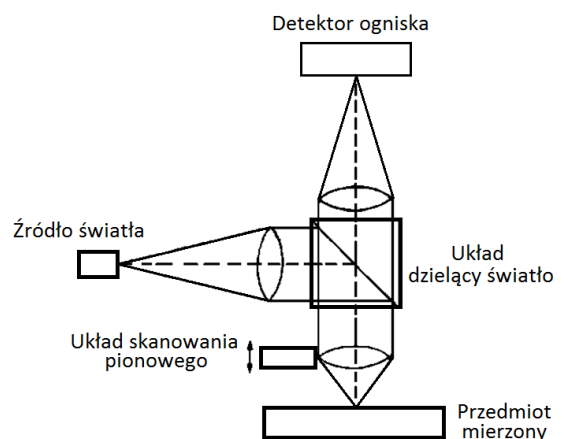
opisującej powierzchniowe techniki pomiaru powierzchni. Na niej oparte są wszystkie urządzenia i rozwiązania pomiarowe proponowane przez Aliconę.

Głównym elementem takiego systemu jest układ optyczny zaczerpnięty z mikroskopu, który można wyposażyć w różne obiektywy, pozwalające na pomiary z różną rozdzielczością. Światło ze źródła przechodzi przez drogę optyczną i pada na powierzchnię mierzonego przedmiotu. Zależnie od jego topografii światło odbite rozprasza się na różne kierunki. Wszystkie promienie wracające od powierzchni i docierające do obiektywu są zbierane w układzie optycznym przez detektor. Ze względu na bardzo małą głębokość ogniskowania układu optycznego tylko mały fragment obiektu ma obraz ostry (w ognisku) i tylko ta część obrazu wykorzystywana jest do dalszego przetwarzania. Całość kształtu uzyskuje się przez skanowanie pionowe powierzchni (zmiana odległości pomiędzy obiektywem a detektorem) i sukcesywne uzupełnienie obszarów, w których poprzednio nie uzyskano ogniskowania. Schemat takiej analizy pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Rekonstrukcja obrazu 3D w systemie różnicowania ogniskowego

Każdy region obiektu ma obraz w ognisku w jednym położeniu pionowym skanera. Zebrane dane z obrazów przetwarzane są na widok trójwymiarowy. Mikroskopia różnicowania ogniskowego umożliwia zatem rekonstrukcję topografii powierzchni z obrazów 2D zarejestrowanych pomiędzy najniższym i najwyższym punktem ogniskowania. System pomiarowy jest przy tym mikroskopem optycznym, a więc wszystkie obrazy mierzonego przedmiotu są kolorowe. Schemat funkcjonowania opisanego systemu pokazano na rysunku 4.

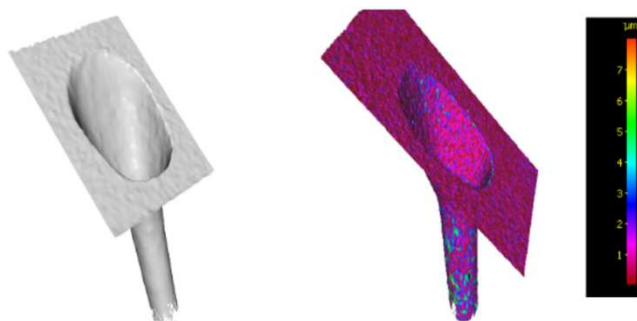


Rys. 4. Działanie systemu różnicowania ogniskowego

Obraz powierzchni kształtowany jest przez system optyczny pozwalający uzyskać zarówno informacje fotometryczne (jasność, kolor itp.) jak i geometryczne (odległości, kształt) [8]. Dla każdego pojedynczego skanu obraz przedmiotu różni się od obrazu zogniskowanego, ponieważ do jego prezentacji wykorzystywane są detektory płaskie, jak np. matryce CCD. Z tego powodu jakkolwiek powierzchnia swobodna będzie miała tylko fragment zogniskowany, a pozostałe obszary będą rozmyte. Dla potrzeb rekonstrukcji topografii zapamiętane zostaną tylko te miejsca, w których dane z detektora będą się pokrywać z danymi z powierzchni ogniskowania obrazu. Dla każdego obrazu z takiej sekwencji obliczane jest ogniskowanie każdego piksela obrazu w porównaniu z pikselami sąsiadującymi (na ogół w kwadracie 15×15) i poszukiwana jest najlepsza ostrość.

Automatyczny pomiar otworów chłodzących

Cienka warstwa substancji chłodzącej chroni łopatkę turbiny przed szkodliwym wpływem ciepła. Można to osiągnąć dzięki wykorzystaniu strumieni zimnego powietrza wydmuchiwanych przez specjalnie w tym celu wykonane (wywiercone) otwory w łopatkach. Powietrze formuje ciekłą warstwę izolacyjną pomiędzy wypaloną mieszkanką gazów spalinowych i powierzchnią łopatek, stwarzając efekt chłodzenia i zabezpieczającą przed przegrzaniem materiału [9]. Aby działanie to było skuteczne otwory chłodzące muszą być wykonane z zachowaniem wymagań geometrii i z odpowiednią dokładnością. Zapewniając jakość wykonania łopatki niezbędna jest weryfikacja ich wykonania, a w szczególności kątów, wielkości liniowych i kształtów. Dotyczy to często nawet 500 różnie ułożonych otworów w stosunku do odpowiadającym im danych CAD. Obraz takiego przykładowego otworu i jego porównanie do danych CAD przedstawiono na rysunku 5.



Dane pomiarowe z powierzchni Odchyłka od modelu CAD
Rys. 5. Otwór w łopatkce turbiny i jego porównanie z danymi CAD

Pomiary optyczne wykonywane za pomocą technologii różnicowania ogniskowego wykorzystywane są szczególnie w dwóch obszarach: otwór wiercony sam w sobie oraz miejsce przejścia powierzchni otworu w powierzchnię łopatki. Parametrami charakteryzującymi wierność wykonania są tu średnica, okrągłość i kąt przejścia. Pomiary otworów chłodzących w różnych pozycjach wykonywane są automatycznie za pomocą specjalnego oprogramowania. Pozwala ono na natychmiastową prezentację odchyłek geometrii rzeczywistej od nominalnej.

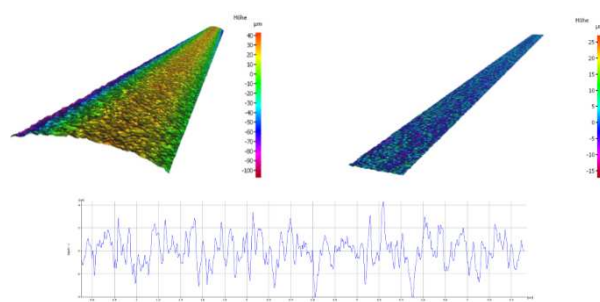
Pomiar krawędzi w celu zwiększenia wydajności i żywotności turbiny

Jak pokazano właściwa geometria mikro otworów jest krytyczna do uzyskania wydajnego filmu chłodzącego. Natomiast odpowiednie przygotowanie krawędzi natarcia i spływu zapewnia optymalne właściwości aerodynamiczne i – w konsekwencji – podnosi wydajność całej turbiny.

Szczególnym wyzwaniem jest również pomiar krawędzi na zamku łopatki, ponieważ występuje tam dużo krzywizn o różnych promieniach. Mikroskopia różnicowania ogniskowego w wykonaniu Alicony jest dobrym sposobem radzenia sobie z tego typu problemami z dwóch zasadniczych powodów. Po pierwsze, dostarcza użytkownikowi wyników o wysokiej rozdzielczości, powtarzalności i identyfikowalności. Po drugie natomiast, wysoka rozdzielczość umożliwia stosowanie nie tylko dopasowania na bazie okręgu, ale również elipsy. To z kolei pozwala mierzyć „rzeczywistą” geometrię krawędzi, co przy dopasowaniu na podstawie okręgu jest tylko częściowo osiągalne. Przy pomiarach zamka, szczególny nacisk kładzie się na weryfikację parametrów geometrycznych, tzn. promieni (zewnątrznych i wewnętrznych), kątów oraz podziałki.

Pomiar chropowatości w celu weryfikacji jakości powłoki

Odpowiednia powłoka nałożona na łopatkę turbiny poprawia jej stabilność, odporność na zużycie i żywotność. Aby to uzyskać producenci łopatek stosują rozwiązania do pomiaru nierówności powierzchni opracowane przez Aliconę, zarówno przed jak i po pokryciu specjalnymi powłokami. Przed pokryciem przeprowadzane są pomiary i obliczanie wysokościowych parametrów topografii powierzchni (określa się wartości S_a , S_q i S_z [10]) aby sprawdzić, czy powierzchnia łopatki turbiny została właściwie przygotowana (czy jest odpowiednio chropowata). Następnie, po pokryciu, badana jest grubość powłoki jako pomiar różnicowy. Jest to osiągalne przez odjęcie od powierzchni pokrytej tej, która została uzyskana przed pokryciem (rys. 6). Konwencjonalne urządzenia do pomiaru grubości powłok w tym przypadku często nie dają zadowalających wyników pomiarów, ponieważ z reguły ich immanentną cechą jest pomiar punktowy. Natomiast żeby sprawdzić jednorodność pokrycia na całej powierzchni niezbędne jest zastosowanie techniki pomiaru powierzchniowego, jaką jest mikroskopia różnicowania ogniskowego wykorzystywana w urządzeniach produkowanych przez Aliconę.



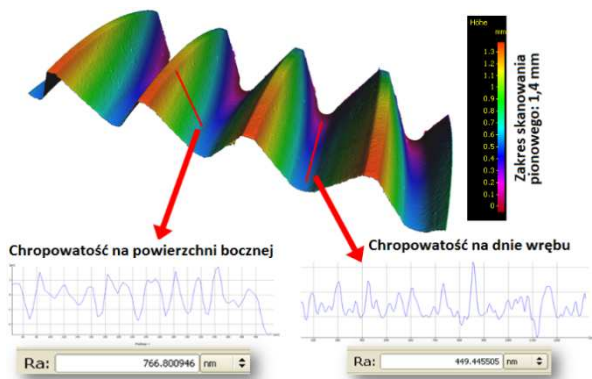
Rys. 6. Trójwymiarowy obraz krawędzi łopatki i analiza powłok

Inne możliwości pomiarowe

System pomiarowy oparty o mikroskop różnicowania ogniskowego pozwala na zebranie nawet kilkudziesięciu milionów punktów pomiarowych w bardzo krótkim czasie, mierzonym w sekundach. W zależności od zastosowanego obiektywu zakres pomiarowy może wynosić od około 3 mm przy rozdzielczości pionowej 10 nm, do ponad 20 mm przy rozdzielczości rzędu 400 nm. Przedmioty mierzone mogą być wykonane z różnych materiałów, o bardzo różnej chropowatości i refleksyjności. Przyrząd daje również informacje cechach geometrycznych mieszczących się w jego zakresie pomiarowym, w tym również na powierzchniach nachylnych prawie pod kątem prostym. Takie możliwości pomiarowe wykorzystuje się naturalnie do innych jeszcze przedmiotów mierzonych w praktyce związanej także z pro-

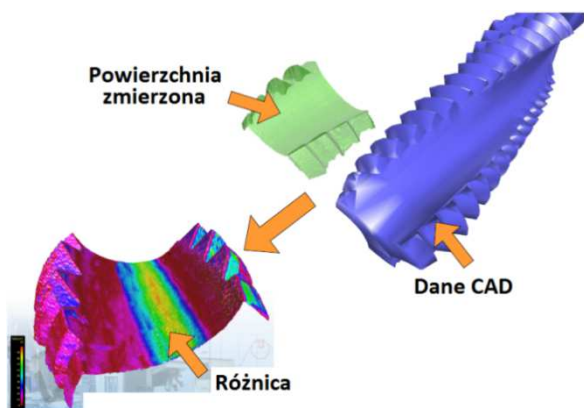
dukcją łopatek, na przykład narzędzi skrawających, w tym również mikro wiertel.

Dzięki dobrej rozdzielczości pionowej i dużemu zakresowi pomiarowemu w osi Z możliwy staje się jednoczesny pomiar nierówności i cech związanych z kształtem. Przykładem tego jest obraz fragmentu gwintownika pokazany na rysunku 7. Pokazano na nim profile nierówności powierzchni z wartością parametru Ra na powierzchni bocznej i na dnie wrębu. Z drugiej natomiast strony odwzorowanie cech geometrycznych umożliwia wyznaczenie wartości kątów i wymiarów liniowych.



Rys. 7. Pomiar nierówności i geometrii gwintownika

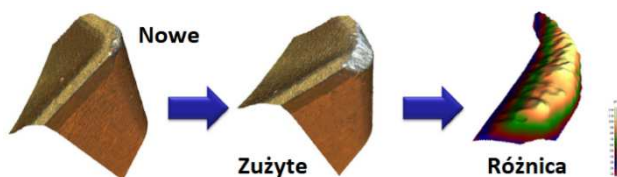
Rozwinięciem tego zagadnienia jest wspomniane już porównanie danych uzyskanych z pomiaru z założeniami konstrukcyjnymi zawartymi w pliku CAD. Taką analizę pokazano na rysunku 8. Zmierzoną powierzchnię narzędzia skrawającego nałożono na dane nominalne, w wyniku czego uzyskano kolorową mapę odchyłek, będącą porównaniem tych dwóch zbiorów danych.



Rys. 8. Porównanie danych nominalnych i pomiarowych w skali mikro dla narzędzia skrawającego

Z uzyskanej różnicy porównywanych danych widać wyraźnie, które fragmenty narzędzia nie zostały wykonane z należytą precyzją.

Podobną aplikacją jest analiza zużycia płytki skrawającej,



pokazana na rysunku 9.

Rys. 9. Analiza zużycia płytki skrawającej

W pierwszym etapie zebrano dane współrzędne punktów pomiarowych z powierzchni fabrycznie nowej płytki skrawającej. Następnie narzędzie wykorzystane zostało w procesie obróbki przedmiotów, a po jego zakończeniu dokonano ponownego skanowania powierzchni płytki. W efekcie uzyskano dwa zbiory danych: pierwotny i końcowy, pokazane odpowiednio po lewej stronie i na środkowej części rysunku. Po prawej stronie pokazano różnicę pomiędzy tymi dwoma zbiorami jako plik wynikowy. Jest on obrazem zużycia narzędzia, czyli ubytku materiału z płytki skrawającej.

Podsumowanie

Mikroskopia różnicowania ogniskowego jest – jak pokazano – jedną z ciekawszych i bardziej wszechstronnych technik zbierania danych z powierzchni w skali nano i mikro. Do zalet tej metody należy zaliczyć fakt, że w przeciwieństwie do wielu innych technik optycznych w mikroskopie różnicowania ogniskowego lokalne pochylenie nie zależy od apertury numerycznej, co pozwala mierzyć nawet bardzo strome zbocza. Ponadto opisaną technikę można realizować przy różnych źródłach światła, na przykład przechodzącym przez obiektyw lub pierścieniowym, z całości lub tylko pewnych fragmentów. Można również używać polaryzatorów światła poprawiających odbłaski, co jest czasem przydatne przy niektórych gładkich powierzchniach metalicznych.

Zastosowanie mikroskopii różnicowania ogniskowego w przemyśle lotniczym nie ogranicza się jedynie do łopatek turbin, ale wychodzi daleko poza nie, umożliwiając bardziej precyzyjną kontrolę jakości już na etapie produkcji.

LITERATURA

- Budzik G. „Dokładność geometryczna łopatek turbin silników lotniczych” Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej Rzeszów 2013.
- Jaskólski J. i in. „Three dimensional scanning of geometry of blade aircraft engine with non-contact measuring methods” *Combustion Engines* 2009-SC1416-421.
- Gapinski B. i in. „Comparison of different methods of measurement geometry using CMM, optical scanner and computed tomography 3D” *Procedia Engineering* 69 2014 255–262.
- Budzik G. „Geometric accuracy of aircraft engine blade models constructed by means of generative rapid prototyping methods FDM and SLA”. *Advances in Manufacturing Science and Technology* 34 1 2010 33-43.
- Mathia T.G. Pawlus P. Wieczorowski M. „Recent trends in surface metrology”, *Wear* 2713-42011 494-508.
- Wieczorowski M. Kierunki rozwoju metrologii nierówności powierzchni *Mechanik* 8-9 2014 467-479/600.
- Wieczorowski M. „Metrologia nierówności powierzchni – metody i systemy”. ZAPOLSzczecin 2013.
- Subbarao M., Choi T., Accurate Recovery of Three-Dimensional Shape from Image Focus, *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence* 17 1995 266-274.
- Steffens K., Wilhelm H. „Next Engine Generation: Materials, Surface Technology, Manufacturing Processes”. *MTU Aero Engines* 2002 1-16.
- Wieczorowski M. Teoretyczne podstawy przestrzennej analizy nierówności powierzchni *Inżynieria Maszyn* 18 3 2013 7-34.