

**Wydział Inżynierii Materiałowej  
Politechniki Śląskiej**



**„MATERIAŁY I TECHNOLOGIE XXI WIEKU”**

**XXII MIĘDZYNARODOWASTUDENCKA SESJA  
NAUKOWA**

**Katowice, 28 maja 2021 r.**

*Redakcja materiałów konferencyjnych:*  
**Łukasz Berestecki, Mateusz Kozioł (Politechnika Śląska)**

**© Copyright by Studenckie Koło Naukowe „MATER-TECH” przy  
Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Śląskiej**

**ISBN 978-83-7880-776-6**

*Wykonano z materiałów dostarczonych przez Autorów.  
Redakcja nie ponosi odpowiedzialności za treść zamieszczonych artykułów.*

# Ocena możliwości regeneracji części maszyn i urządzeń z wykorzystaniem systemu LENS

*Izabela Barwińska<sup>1,2,\*</sup>, Tomasz Durejko<sup>1</sup>, Mateusz Kopeć<sup>2</sup>, Zbigniew L. Kowalewski<sup>2</sup>*

**Opieka naukowa:** dr inż. Tomasz Durejko

<sup>1</sup> Wojskowa Akademia Techniczna, Instytut Inżynierii Materiałowej  
ul. gen. Sylwestra Kaliskiego 2, 00-908 Warszawa

<sup>2</sup> Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Zakład Mechaniki Doświadczalnej  
ul. Pawińskiego 5B, 02-106 Warszawa

\*ibarw@ippt.pan.pl

## Abstrakt

W niniejszej pracy zaproponowano wykorzystanie metody LENS do regeneracji modelowych elementów wykonanych ze stopu Inconel 625. Podczas badań wstępnych użyto sferycznego proszku ze stopu Inconel 625 o wielkości cząstek z przedziału 50-100  $\mu\text{m}$  oraz materiału podłoża wykonanego z tego samego materiału. Próby regeneracji przeprowadzono z użyciem lasera o mocy 550 W przy szybkości podawania proszku równej 12 RPM. Zastosowano trzy różne metody wypełniania modelowych ubytków, tj.: wypełnienie bez konturu (tylko w objętości modelowego ubytku), wypełnienie z konturem i w objętości ubytku oraz wypełnieniem tylko w postaci konturu. Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że regeneracja powinna przebiegać na podgrzewanym podłożu, a proces napawania należy realizować w więcej niż dwóch przejściach, co do grubości napoiiny.

**Słowa kluczowe:** technologie laserowe 3D, regeneracja, LENS (Laser Engineered Net Shaping), techniki przyrostowe

## Wprowadzenie

Regeneracja jest procesem mającym na celu przywrócenie właściwości użytkowych części maszyn, które zostały uszkodzone w wyniku eksploatacji, bądź niewłaściwego użytkowania. Procesom naprawy podlegają m.in. elementy części maszyn i urządzeń, których nie można już zakupić lub gdy koszt nowej części wielokrotnie przewyższa koszt regeneracji. Regeneracja pozwala nie tylko na zmniejszenie całkowitych kosztów produkcji wyrobów, ale również na znaczne ograniczenie ilości odpadów „uciążliwych” dla środowiska [1, 2].

Regenerację można przeprowadzić za pomocą wielu metod w zależności od charakteru występującego uszkodzenia. Najczęściej jednak stosuje się metody spawalnicze oraz techniki wykorzystujące nakładanie powłok metalicznych, takie jak napawanie oraz natryskiwanie cieplne. Proces napawania polega na nanoszeniu i przetapianiu proszku/drutu metalicznego w miejscu uszkodzenia detalu w celu odtworzenia jego geometrii i uzyskania wysokiej jakości połączenia metalurgicznego pomiędzy napoiną a naprawianym elementem. Obecnie procesy tego typu są najczęściej wykorzystywanymi metodami regeneracji. Szacuje się, że aż 65% elementów części maszyn i urządzeń wymagających naprawy jest regenerowanych za pomocą tych metod. Natryskiwanie cieplne polega natomiast na stopieniu materiału wsadowego, a następnie naniesieniu go za pomocą urządzenia metalizacyjnego na powierzchnię detalu, dzięki czemu powstaje powłoka metaliczna [1 -3].

Pomimo wielu zalet, technologie napawania posiadają również wady. Głównym problemem jest trudność w odwzorowaniu złożonych kształtów detali, szeroka strefa wpływu ciepła oraz trudność w uzyskaniu odpowiedniego składu chemiczno-fazowego w napoinie. Wymienione problemy dotyczą głównie technik

spawalniczych, a uniknąć ich można stosując metody regeneracyjne wykorzystujące promieniowanie laserowe [4].

Techniki laserowe są coraz częściej stosowane do odtwarzania wskaźników eksploatacyjnych elementów części maszyn i urządzeń. O ich wzrastającym znaczeniu w tym obszarze decydują szczególne właściwości promieniowania laserowego. Do niewątpliwie nowatorskich rozwiązań należy zaliczyć metodę LENS (Laser Engineered Net Shaping), która należy do technik przyrostowych, a dzięki bezpośredniemu podawaniu proszku w strefę działania wiązki laserowej może być wykorzystywana również do regeneracji [4,5].

System napawania laserowego LENS jest techniką pozwalającą na tworzenie modeli 3D. Składa się on z lasera światłowodowego oraz toru optycznego o odpowiednio zogniskowanej wiązce laserowej, co z kolei umożliwia przetopienie napawanego materiału. Urządzenie LENS posiada 2 zasobniki z proszkiem, dzięki czemu możliwe jest dowolne mieszanie metali w trakcie napawania. Proces przeprowadzany jest w komorze roboczej wypełnionej argonem 5N, w której znajduje się obrotowo-uchyłny stół roboczy oraz głowica poruszająca się w osi X, Y, Z. Proszek za pomocą gazu osłonowego podawany jest przez mechaniczno-pneumatyczny system do dysz znajdujących się w głowicy, które kierują go w ognisko lasera znajdujące się na napawanym podłożu. LENS, tak jak inne metody przyrostowe, posiada możliwość programowania wykorzystując modele 3D otrzymane w systemie CAD. Urządzenia LENS pozwalają na tworzenie detali o złożonych kształtach i zróżnicowanych gabarytach, których nie da się odwzorować innymi metodami. Ponadto, umożliwiają przetapianie proszków metalicznych, ceramicznych i metaloceramicznych o wysokiej temperaturze topnienia, jak również o wysokiej skłonności do utleniania. Technika LENS nie posiada istotnych ograniczeń związanych z kształtem napawanego podłoża, co umożliwia m.in. regenerację detali o nieregularnych powierzchniach. Kluczową zaletą naprawy za pomocą systemu LENS jest cienka ścieżka napoiny, której nie można uzyskać konwencjonalnymi metodami spawalniczymi. Wiąże się to z dużą dokładnością odwzorowania detalu, jak i z dostarczeniem dużo mniejszej ilości ciepła w głąb elementu, co skutkuje mniejszą strefą wpływu ciepła. Niski poziom ciepła wprowadzony do podłoża zmniejsza wartości odkształcenia oraz naprężenia w materiale. Ma to szczególnie istotne znaczenie w trakcie regeneracji elementów o cienkich przekrojach [6,7].

Zużywanie się części maszyn i urządzeń jest nierozłącznym efektem eksploatacyjnym, który prowadzi do różnych rodzajów zniszczeń. Każdy rodzaj zużycia powoduje inne uszkodzenie, które w mniejszym, bądź większym stopniu wpływają na prawidłową pracę urządzenia. Ważnym etapem w procesie konstruowania elementów części maszyn i urządzeń jest projektowanie, które uwzględnia identyfikację potrzeb produktu. Na tym etapie możliwe jest zaprojektowanie elementu odpornego na najbardziej szkodliwe rodzaje zużycia, jak np. szczepianie pierwszego rodzaju, bądź tarcie ślizgowe i zastąpienie ich procesami, które będą miały w mniejszym stopniu niekorzystny wpływ na dany element konstrukcyjny. Pomimo minimalizacji czynników prowadzących do zniszczenia, każdy eksploatowany element ma określony czas sprawności, co w konsekwencji prowadzi do całkowitej utraty wskaźników eksploatacyjnych danego wyrobu i kończy się złomowaniem bądź recyklingiem [1].

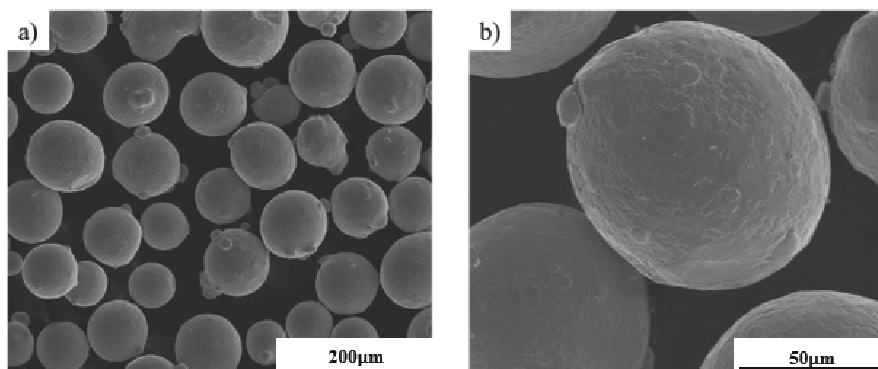
W związku z dużym zapotrzebowaniem na nowe i bardziej precyzyjne techniki regeneracji, w szczególności w ujęciu przemysłowym, gdzie istotne jest odwzorowanie cech wytrzymałościowych i używane są trudnotopliwe materiały o niskich zasobach, za główny cel pracy przyjęto eksperymentalną ocenę możliwości regeneracji elementów modelowych o różnych kształtach za pomocą techniki przyrostowej LENS, gdzie jako materiał badawczy przyjęto Inconel 625. Głównym celem niniejszej pracy jest ocena możliwości odwzorowania kształtu

„modelowo uszkodzonych powierzchni” oraz uzyskania wysokiej jakości połączenia pomiędzy napoiną a regenerowanym podłożem za pomocą techniki LENS.

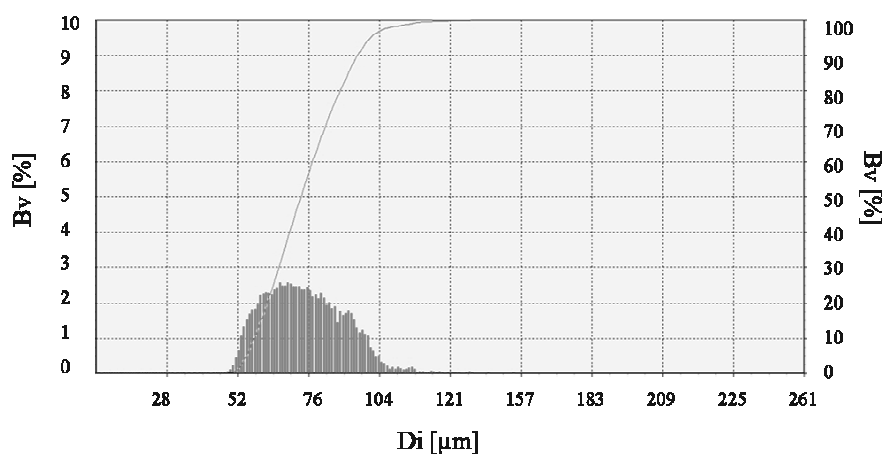
### Materiały i zastosowane metody badań

W ramach badań wstępnych dokonano analizy składu chemicznego oraz morfologii cząstek proszku wsadowego w stanie dostawy z użyciem mikroskopu skaningowego typu FEI Quanta 3D FEG z przystawką EDS (Rys.1, Tab.1). W przeprowadzonej pracy wykorzystano proszek Inconel 625 (Rys. 1) o składzie chemicznym przedstawionym w Tabeli 1. Przy pomocy analizatora wielkości cząstek IPSU (Kamika) stwierdzono, że średnia wielkość cząstek proszku Inconel 625 wynosi około 70  $\mu\text{m}$  (Rys. 2). Dobór właściwych parametrów oraz finalny proces przeprowadzono z użyciem urządzenia LENS 850-R. Specyfikacja urządzenia dostępna jest w literaturze [6]. Badania zasadnicze zostały przeprowadzone na próbkach modelowych w postaci kieszeni otrzymanych za pomocą frezarki Haas VF-1B. Każda z powstałych kieszeni charakteryzowała się różnym kształtem (kwadrat, sześciokąt i „koniczyna”), aby w efekcie końcowym możliwe było kompleksowe zweryfikowanie możliwości regeneracyjnych systemu LENS wraz z ewentualnymi ograniczeniami w tym obszarze. Niezależnie od przyjętych kształtów poszczególnych kieszeni, wszystkie miały tę samą głębokość równą 1 mm.

Po przeprowadzonej regeneracji próbki zostały zbadane pod kątem jakości połączenia napawanego proszku (napoiny) z materiałem rodzimym. W tym celu przeprowadzono obserwacje mikroskopowe strefy przejścia napoina/rdzeń z użyciem mikroskopu optycznego Nikon MA220 oraz pomiary tomograficzne z wykorzystaniem mikrotomografu NIKON X-TEK XT H225 MICRO-CT.



Rys. 1 Widok ogólny proszku wsadowego Inconel 625 (a); widok pojedynczej cząstki proszku (b)



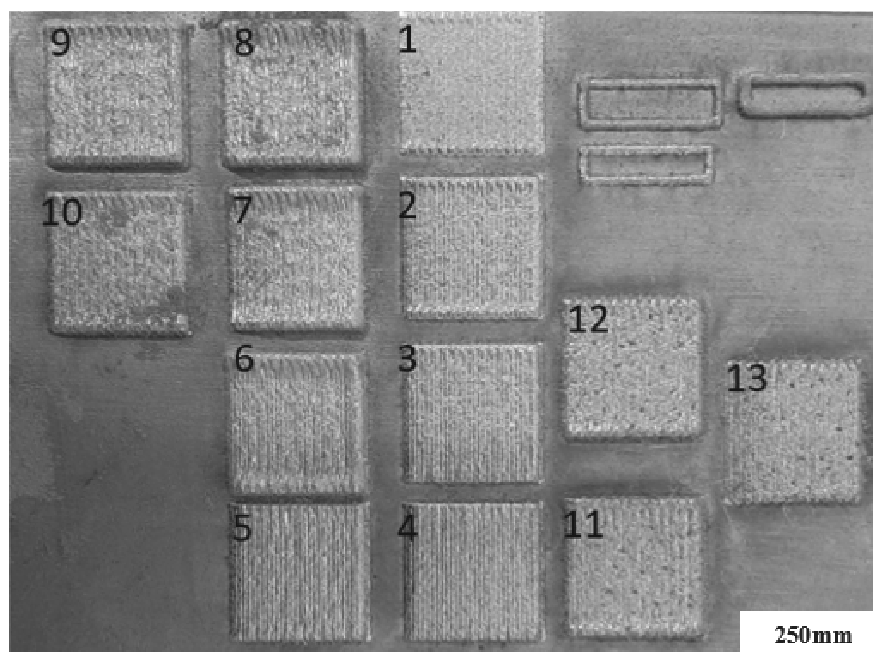
Rys. 2 Histogram cząstek proszku wsadowego Inconel 625 (udział frakcji oznaczony linią ciągłą – oś rzędnych po prawej stronie oraz rozkład wielkości cząstek przedstawiony za pomocą histogramu – oś rzędnych po lewej stronie)

Tab. 1 Skład chemiczny proszku Inconel 625

Pierwiastek	O	Fe	Ni	Al	Si	Zr	Nb	Mo	Cr	Mn
% wag.	2,18	5,10	55,87	0,38	0,34	0,48	3,83	9,03	22,53	0,27

## Wyniki i dyskusja

Wstępne próby technologiczne nanoszenia proszku na podłoże Inconel 625 zostały przeprowadzone przy użyciu modułu Line BuildDeposition, który umożliwił szybsze wyznaczenie parametrów pozwalających na osiągnięcie założonej grubości napoiny (Rys. 3 (napoiny 1-5)). Podczas napawania modułem Line BuildDeposition próbki testowe wytwarzano utrzymując stałe parametry procesu, tj.: moc lasera równą 500W i szybkość posuwu głowicy laserowej na poziomie 10,5 mm/s. Za zmienny parametr przyjęto szybkość podawania proszku. Dla każdego z otrzymanych wariantów testowych zmierzono ich grubość w celu wyznaczenia szybkości podawania proszku pozwalającej uzyskiwać grubości napoiny wynoszącej około 1mm w jednym przejściu. Następnie powtórzono proces napawania przy zastosowaniu modułu Teach and Learn, w którym w pierwszej kolejności „obrysowywany” był kontur, a następnie wypełniano jego wnętrze (Rys. 3 (6-13)). Po przeprowadzeniu obserwacji makroskopowych stwierdzono, że powstałe napoiny nie spełniają założonych wymagań geometrycznych i jakościowych. Podczas napawania na kontur nanosiło się zbyt dużo proszku, co w konsekwencji prowadziło do niekontrolowanego zwiększenia jego grubości. Celem kolejnych prób technologicznych było dobranie takich warunków procesu, aby grubość napoiny była jednorodna na całej powierzchni testowanej. W pierwszej kolejności postanowiono zmienić czas zwłoki włączenia/wyłączenia lasera (Laser On/Off Wait), względem startu napawania, co jednak nie przyniosło oczekiwanych efektów geometrycznych. W następnych próbach sterowanym parametrem był posuw oraz włączanie/wyłączanie lasera, ale ściśle skorelowane z ruchem głowicy (Laser Off/On ShutterDelay). Parametry wykorzystane do optymalizacji napawania systemem LENS przedstawiono w Tab. 2. Finalnie do wykonania napoin wytypowano parametry przedstawione w Tab. 3.



Rys. 3 Efekty wstępnych prób technologicznych napawania systemem LENS proszku Inconel 625

1 – 5 napawaniemodulem *Line Build Deposition*,  
6 – 16 napawanie modulem *Teach and Learn*

Tab.2 Parametry wykorzystane do optymalizacji napawania systemem *LENS*

Nr próbki	Moc lasera [W]	Posuw [mm/s]	Szybkość podawania proszku [RPM]	Laser On/Off Wait[ms]	Laser Off/On Shutter Delay[ms]	Temp podłoża [°C]
1	550	10,5	6	-	-	23
2	550	10,5	8	-	-	23
3	550	10,5	10	-	-	23
4	550	10,5	11	-	-	23
5	550	10,5	12	-	-	23
6	550	7,5	12	1	0	23
7	550	7,5	12	1	0	23
8	550	7,5	12	1	50	23
9	550	7,5	12	50	0	23
10	550	7,5	12	100	0	23
11	550	9	12	200	0	23
12	550	10,5	12	400	0	23
13	550	10,5	12	400	0	23

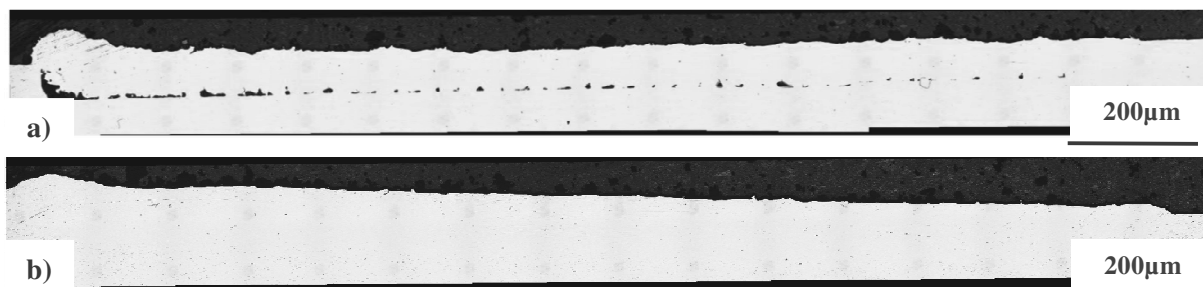
Po naniesieniu materiału na wcześniej przygotowane ubytki modelowe, pobrane zostały próbki do obserwacji makroskopowych w celu oceny jakości metalurgicznej naniesionych napoin. Obserwacje makrostruktury napawanych elementów przedstawiono na (Rys. 4a). Uzyskane wyniki wskazują na występowanie nieciągłości w strefie przejścia napoina/materiał rodzimy dla napoin otrzymanych w jednym przejściu i nanoszonych na nienagrzone podłoże. W celu poprawy jakości metalurgicznej na granicy rozdziału napoina/podłoże, w kolejnych próbach technologicznych nagrzewano objętościowo podłoże do temperatury 300°C, oraz zwiększono liczbę przejść na grubości do trzech, przy zachowaniu finalnej grubości napoiny o wartości 1 mm. Temperatura materiału rodzimego wpływa na dyfuzyjność atomów na jego powierzchni. Podgrzanie podłoża zapewnia szybkie i bez defektowe nanoszenie napoiny oraz pozwala zminimalizować ryzyko powstawania struktur amorficznych na powierzchni nanoszenia [8].

Tab.3 Główne parametry wykorzystane do napawania systemem *LENS*

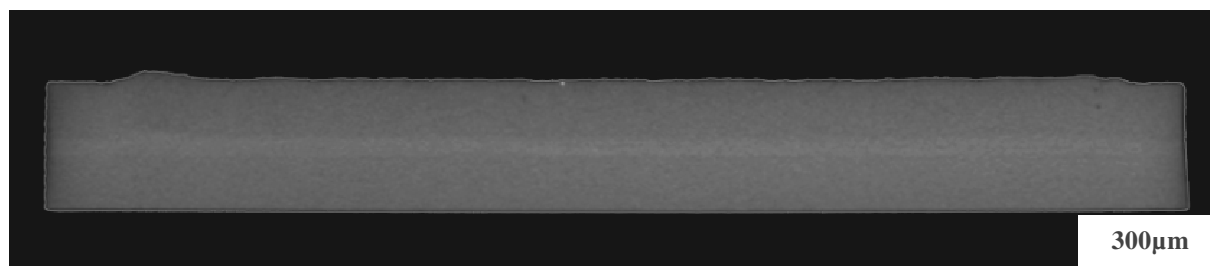
Parametr	Moc lasera [W]	Posuw [mm/s]	Szybkość podawania proszku [RPM]	Laser On/Off Wait[ms]	Laser Off/On Shutter Delay[ms]	Temp podłoża [°C]
Wartość	550	10,5	12	0	400	300

Efekt optymalizacji warunków nanoszenia widoczny jest na zdjęciu makroskopowym (Rys. 4b). Otrzymana napoina charakteryzuje się właściwą grubością oraz brakiem nieciągłości w strefie połączenia z materiałem rodzimym. Dla potwierdzenia poprawności zastosowanych parametrów przeprowadzono dodatkowe badania tomograficzne mające na celu ewentualną lokalizację nieciągłości zarówno w objętości napoiny, jak i na granicy

rozdziła napoina/podłoże. Przeprowadzone badania nie wykazały żadnych defektów w analizowanych obszarach (Rys. 5).



Rys.4 Makroskopowe widoki napoiny: (a) bez optymalizacji warunków nanoszenia; (b) z optymalizacją warunków nanoszenia (podgrzewane podłoże, trzy przejścia na grubości)



Rys. 5 Przekrój wzdłużny finalnej napoiny wykonany techniką tomograficzną

## Podsumowanie

Analizując uzyskane wyniki z badań napoin ze stopu Inconel 625 otrzymanych laserową techniką przyrostową LENS stwierdzono, że napawanie powinno być przeprowadzane w warunkach podwyższonej temperatury podłoża. Ponadto, ubytki powinny być wypełnianie w co najmniej trzech przejściach z wykorzystaniem sferycznego proszku Inconel 625, co w konsekwencji gwarantuje otrzymanie napoiny o właściwej geometrii i bez występowania nieciągłości w strefie przejścia napoina/materiał rodzimy.

## Literatura

1. Stanisław Legutko – „Postawy eksploatacji maszyn i urządzeń”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 2004
2. Cezary Bocheński – „Naprawa maszyn i urządzeń rolniczych”, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, 1997
3. Tadeusz Hejwowski – „Nowoczesne powłoki nakładane cieplnie odporne na zużycie ścierne i erozyjne”, Wydawca: Politechnika Lubelska, 2013
4. Wojciech Napadłek, Wojciech Chrzanowski, Tomasz Durejko, Piotr Garyga – „Laserowe technologie 3D rewitalizacji łopatek turbin parowych stopnia NP stosowanych w energetyce – problematyka technologiczna i diagnostyczna”, Badania Nieniszczące i Diagnostyka nr 3 (pp. 7 – 11), 2017
5. Wojciech Napadłek, Wojciech Chrzanowski, Adam Woźniak – „Przyrostowe technologie 3D w odbudowie kształtu zużytych eksploatacyjnie łopatek turbin parowych”, Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe, R. 18, nr 12 (pp.1147 – 1151), 2017
6. Tomasz Durejko, Michał Ziętała, Magdalena Łazińska – „Analiza możliwości dwustanowiskowego systemu LENS”, Mechanik, R. 87, nr 12, 28-3, 2014
7. Martin Hedges, Neil Calder – „Near Net Shape Rapid Manufacture & Repair by LENS” In Cost Effective Manufacture via Net-Shape Processing (pp. 13-1 – 13-14). Meeting Proceedings RTO-MP-AVT-139, Paper 13. Neuilly-sur-Seine, France: RTO. Available from: <http://www.rto.nato.int/abstracts.asp>



8. Milton Ohring, Chapter 7 - Substrate Surfaces and Thin-Film Nucleation, Editor(s): Milton Ohring, Materials Science of Thin Films (Second Edition), Academic Press, 2002, Pages 357-415, <https://doi.org/10.1016/B978-012524975-1/50010-0>.