

**dr inż. Bogusław Grabas**

Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

Centrum Laserowych Technologii Metali

Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych

Politechnika Świętokrzyska w Kielcach

**AUTOREFERAT  
PREZENTUJĄCY OPIS DOROBKU  
I  
OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH**

**1. Imię i Nazwisko**

**Bogusław Grabas**

**2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej**

1988 – magister inżynier metalurgii, specjalność: gospodarka cieplna i budowa pieców, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

1992 – Diplome d'Etudes Approfondies (Dyplom Studiów Pogłębionych), Instytut National des Sciences Appliquees de Lyon, Francja.

1996 – doktor nauk technicznych, Instytut National des Sciences Appliquees de Lyon, Francja, formation doctorale : thermique et energetique.

Promotor : Profesor Michel Laurent

Jednostka nostryfikująca : Instytut Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie, 1996.

Dyscyplina naukowa : inżynieria materiałowa.

Tytuł rozprawy doktorskiej : *Influence de la penetration en soudage laser sur les temperatures superficielles ( Wpływ głębokości spawu wykonanego metodą laserową na temperatury powierzchniowe )*

**3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych**

3.06.1996 – 30.11.1996 Instytut Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie, Samodzielna Pracownia Technologicznych Zastosowań Laserów, stanowisko : starszy asystent

1.12.1996 – 30.09.2001 Instytut Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie, Samodzielna Pracownia Technologicznych Zastosowań Laserów , stanowisko : adiunkt

1.10.2001 – 28.02.2016 Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, stanowisko : adiunkt

1.03.2016 - 28.02.2018 Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, stanowisko : starszy wykładowca

Od 1.03.2018  
do chwili obecnej

Politechnika Świętokrzyska, Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn, Centrum Laserowych Technologii Metali, Katedra Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych, stanowisko : wykładowca

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.)**

**a) tytuł osiągnięcia naukowego:**

Moje osiągnięcie naukowe w rozumieniu art. 16 ust. 2 Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami, stanowi jednotematyczny cykl publikacji technologiczno - badawczych zatytułowany:

**„ Technologia laserowo-wibracyjnego rozwijania powierzchni grzejnych jako pasywna metoda intensyfikacji wymiany ciepła”**

**b) wykaz prac naukowych dokumentujących osiągnięcie technologiczno - badawcze, stanowiące podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.**

1. T. Orzechowski, B. *Grabas*, *Wymiana ciepła przy wrzeniu na powierzchni modyfikowanej wiązką lasera*. Rozdział w monografii: **XX Jubileuszowy Zjazd Termodynamików**, Termodynamika w nauce i gospodarce, t. II, 156-161, 2008. (Rozdział w monografii. Mój udział procentowy oceniam na 20%)
2. B. Grabas, Patent PL 201106, *Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych*. 2009.
3. B. Grabas, *Laserowo-wibracyjna metoda zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych*, Zeszyty naukowe 17. Nauki techniczne – Budowa i eksploatacja maszyn. Terotechnologia 2011. Wydawnictwo Politechniki Świętokrzyskiej, Kielce 2012, 50 -57. (Materiały konferencyjne)
4. B. Grabas, Patent PL 207358, *Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych*. 2010.
5. B. Grabas, Patent PL 210889, *Sposób zwiększania powierzchni czynnej elementów metalowych, zwłaszcza powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych*. 2011.
6. B. Grabas, Patent Europejski, nr 2521798 *A method of increasing heat exchange surfaces of elements made of metal or metal alloys*. 2014.

7. B. Grabas , *Impact of the Parameters of Laser-Vibration Treatment on the Roughness of Aluminium Melts*. Adv. Mater. Res., 874, 71-75, 2014. (Materiały konferencyjne indeksowane na WoS, liczba punktów w roku wydania: 10)
8. B. Grabas, *An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects*. Arch. Metall. Mater., 60, 1, 33-39, 2015. ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 30, impact factor w roku wydania: 0 )
9. B. Grabas, *Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement*. Exp. Therm. Fluid Sci., 68, 499-508, 2015. ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 35, impact factor w roku wydania: 2.12 )
10. M. Piasecka, K. Strąk, B. Maciejewska, B. Grabas, *A study of the flow boiling heat transfer In a mini channel for a heated Wall with surface texture produced by vibration-assisted laser machining*. J. Phys.: Conf. Ser. **745**, 032123. Mój udział procentowy oceniam na 25%)
11. K. Strąk, M. Piasecka, B. Grabas, *The use of vibration-assisted laser surface texturing to enhance flow boiling heat transfer in a minichannel*. Mechanik, 12, 871-877, 2016.. (Lista B MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 11. Mój wkład procentowy oceniam na 20%)
12. M. Piasecka, K. Strąk, B. Grabas, *Vibration-assisted laser surface texturing and electromachining for the intensification of boiling heat transfer in a minichannel*. Arch. Metall. Mater., 62, 4, 1983-1990, 2017. ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: brak danych, impact factor w roku wydania: brak danych . Mój wkład procentowy oceniam na 20% )

Powyższy cykl publikacji został przedstawiony w porządku chronologicznym zgodnie z kolejnością powstawania poszczególnych opracowań.

**c) omówienie celu naukowego prac wymienionych w punkcie 4b i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.**

## MOTYWACJA

Moja praca naukowo-dydaktyczna w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach koncentruje się wokół zagadnień obróbek laserowych elementów metalowych, ze szczególnym uwzględnieniem obróbek przetopieniowych : spawania, mikrospawania laserowego oraz rozwijania powierzchni wymiany ciepła. Na wybór moich zainteresowań naukowych koncentrujących się na przetopieniowych obróbkach laserowych wywarły wpływ w dużej mierze wyniki prac

badawczych nad kontrolowaniem spawania laserowego prowadzonych przeze mnie podczas doktoratu.

Moje badania naukowe nad rozwijaniem powierzchni wymiany ciepła zostały zapoczątkowane udziałem w pracy badawczej opisanej w artykule [1] zrealizowanej na Politechnice Świętokrzyskiej w roku 2007. Badania te dotyczyły oceny skuteczności intensyfikacji wymiany ciepła elementu metalowego poddanego obróbce laserowej. Przygotowanie elementu polegało na wykonaniu ciągłych przetopień laserowych wykonanych techniką z kanałem parowym. W ramach planowanego eksperymentu pokryłem powierzchnię elementu ze stali nierdzewnej trzema równoległymi przetopieniami laserowymi o wysokości ok. 200  $\mu\text{m}$ . Przetopienia te przypominały kształtem mikrożebra o rozbudowanej morfologii powierzchni lica. Element ten pełnił w eksperymencie rolę powierzchni grzejnej wymiennika ciepła. Celem wykonania przetopień było przekształcenie gładkiej powierzchni na powierzchnię rozwiniętą o zwiększonej chropowatości oraz stworzenie warunków sprzyjających procesowi wrzenia pęcherzykowego, a tym samym wzrostowi współczynnika wymiany ciepła w stosunku do powierzchni gładkiej. Dla tak wykonanych przetopień badania wymiany ciepła podczas wrzenia pęcherzykowego wody destylowanej wykazały około dwukrotny wzrost współczynnika wymiany ciepła w stosunku do powierzchni próbek nieobrobionych.

Jak się okazało, wybór technologii laserowej do wykonania przetopień powierzchni nie był przypadkowy, gdyż przetapianie laserowe wykonane w obecności kanału parowego tworzy specyficzny kształt powierzchni o zmienionej strukturze geometrycznej i znacznie podniesionej chropowatości. Wzrost chropowatości powierzchni będący wynikiem głównie termokapilarnego ruchu jeziora płynnego metalu wokół przemieszczającego się kanału parowego jest zjawiskiem niepożądanym np. w budowie maszyn w związku z czym stosowane są dodatkowe zabiegi ( np. szlifowanie ) zapewniające wymaganą niską chropowatość powierzchni obrobionych laserowo. Szlifowanie stosuje się przede wszystkim po spawaniu laserowym do wygładzania lica spoin oraz do wygładzania warstw wierzchnich otrzymanych w wyniku stosowania laserowych obróbek powierzchniowych przetopieniowych.

Nietypowy jak dla mnie cel wykonania przetopień laserowych zainspirował mnie do zainteresowania się problematyką intensyfikacji wymiany ciepła jako potencjalnego pola zastosowań obróbki laserowej. Na podstawie analizy specjalistycznej literatury naukowej dotyczącej zagadnień związanych z wymianą ciepła dokonałem pewnego rozeznania problemu, które można streścić w następujących punktach:

1. W analizowanych badaniach zastosowano modyfikację powierzchni grzejnej elementu metalowego należącą do tzw. pasywnych metod intensyfikacji wymiany ciepła. W metodach tych dąży się do intensyfikacji wymiany ciepła przy wrzeniu poprzez modyfikację gładkiej powierzchni grzejnej.
2. Próby zastąpienia gładkiej powierzchni powierzchnią modyfikowaną o zwiększonym współczynnikiem wymiany ciepła związane są z postępującą miniaturyzacją urządzeń wydzielających podczas pracy ciepło. Postępująca miniaturyzacja, która obejmuje różne

dziedziny przemysłu jak: elektronikę, motoryzację, inżynierię chemiczną, technikę kosmiczną i inne prowadzi do sukcesywnego wzrostu gęstości przepływających w tych urządzeniach strumieni cieplnych, głównie przez redukcję pola powierzchni wymiany ciepła. Nieustanna redukcja powierzchni wymiany ciepła wymusza stosowanie wymienników ciepła o coraz wyższych współczynnikach wymiany ciepła. W efekcie, stosowane dotychczas bardzo wydajne energetycznie metody odbioru ciepła wykorzystujące technicznie gładką powierzchnię grzejną wymiennika ciepła z wykorzystaniem zjawiska zmiany fazy czynnika odbierającego ciepło ( głównie w obecności wrzenia pęcherzykowego ) okazują się w coraz większym stopniu niewystarczającym sposobem chłodzenia współczesnych urządzeń.

3. Obecnie rozwijana jest duża liczba pasywnych metod intensyfikacji wymiany ciepła w których powierzchnię modyfikuje się stosując następujące typy oddziaływań :

- chemiczne – wżery uzyskane na drodze reakcji chemicznej
- cieplne – natryskiwanie cieplne plazmowe i w łuku elektrycznym, spiekanie cząstek metalu, laserowe : mikrodrażenie, ablacja, spiekanie, przetapianie,
- mechaniczne – mikrozeberkowanie powierzchni, stosowanie drobno naciętych rowków, wykonywanie wgłębień, bruzd, otworów, wypustek, piaskowanie, obróbka papierem ściernym,
- elektroerozyjne – nakładanie na drodze wyładowań elektrycznych warstw metalicznych o wysokiej chropowatości.

4. Dąży się do tego, aby rozwinięciu powierzchni towarzyszył wzrost chropowatości, bądź wzrost porowatości, co sprzyja zwiększeniu liczby aktywnych zarodków nukleacji oraz stabilizuje ich działanie. Obecnie wytwarzane przemysłowo powierzchnie grzejne pozwalają uzyskać nawet czterokrotne zwiększenie współczynnika wymiany ciepła. Z uwagi na to, iż wykonanie tych powierzchni jest skomplikowane i kosztowne, rozwijane są badania ukierunkowane na opracowanie technologii, które pozwolą na wytwarzanie w skali przemysłowej zmodyfikowanych powierzchni grzejnych przy obniżonych kosztach wytwarzania.

5. W opublikowanych dotychczas bardzo nielicznych ( znalazłem 7 pozycji literaturowych ) pracach eksperymentalnych poświęconych wykorzystaniu obróbki laserowej w pasywnych metodach intensyfikacji wymiany ciepła, badane powierzchnie rozwijane były na drodze mikrodrażenia, ablacji oraz selektywnego spiekania laserowego :

Chu RC, Moran KP. *Method for customizing nucleate boiling heat transfer from electronic units immersed in dielectric coolant*. United States patent US 4050507. 1975 June 27.

Orzechowski T. *Boiling heat transfer on the fin with laser modified surface*. *Int. Symp. on Convective Heat and Mass Transfer in Sustainable Energy*; April 26 – May 1; Tunisia 2009:1-14.

Radek N., Orman ŁJ. *Preliminary data of boiling heat transfer of laser treated heat exchanger surfaces*, in: Shalapko JI, Dobrzański LA, editors. *Scientific basis of modern technologies: experience and prospects*, Khmelnytskyi National University, Jaremche, Ukraine; 2011, p. 236-245.

Piasecka M. *FLOW BOILING HEAT TRANSFER IN A MINICHANNEL WITH ENHANCED HEATING SURFACE*. Heat Transfer Eng. 2014;35:903-912.

Piasecka M. *Heat transfer mechanism, pressure drop and flow patterns during FC-72 flow boiling in horizontal and vertical minichannels with enhanced walls*. Int. J. Heat Mass Transfer 2013;66:472-488.

Ameli M, Agnew B, Leung PS, Ng B, Sutcliffe CJ, Singh J, McGlen R. *A novel method for manufacturing sintered aluminium heat pipes (SAHP)*. Appl. Therm. Eng. 2013;52:498-504.

Sommers AD, Yerkes KL. *Using micro-structural surface features to enhance the convective flow boiling heat transfer of R-134a on aluminum*. Int. J. Heat Mass Transfer 2013;64:1053–1063.

We wszystkich wymienionych powyżej publikacjach notowano około dwukrotny wzrost współczynnika wymiany ciepła w stosunku do powierzchni gładkiej:

W efekcie przeprowadzonej dodatkowej analizy literaturowej dotyczącej ogólnie pojętych zagadnień technologii laserowych pojawiły się dwie koncepcje rozwijania powierzchni wymiany ciepła.

Pierwsza koncepcja była oparta na wykorzystaniu wybranych przetopów laserowych kwalifikowanych jako tzw. niezgodności spawalnicze :

a) podcięcie lica przetopu (termin angielski zjawiska: undercut) - uzyskuje się tutaj przetop o mocno wyniesionym licu zakończonym główką z równoczesnym jego zwężeniem u podstawy. Skanując liniowo wiązką laserową po materiale można otrzymać mikrożeberkowanie powierzchni,

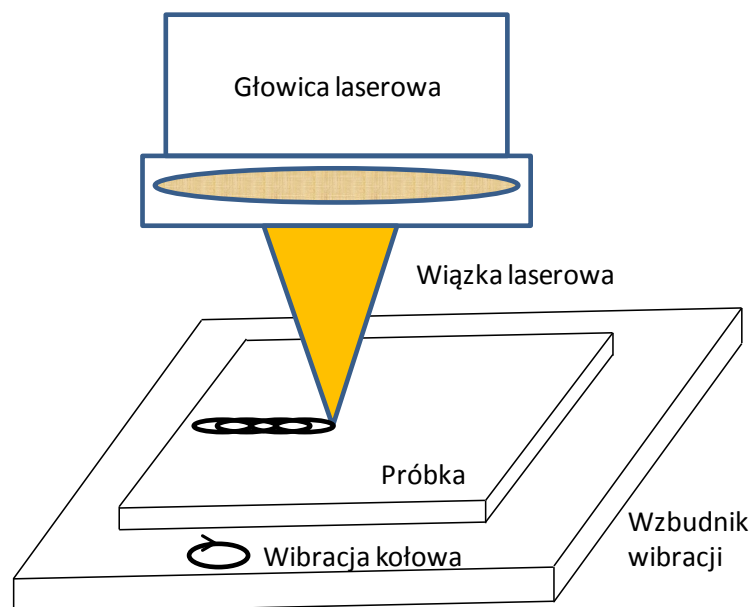
b) wypływ grani z równoczesną zapaścią lica przetopu (termin angielski zjawiska: drop out). Można uzyskać w ten sposób obustronne żeberkowanie powierzchni o silnie rozwiniętej chropowatości. Taki sposób przetopienia można stosować w sytuacji, gdy możliwy jest dostęp tylko do jednej powierzchni elementu,

c) wygarbienia przetopu (termin angielski zjawiska: humping) - otrzymuje się tutaj przetop o silnie pofałdowanej powierzchni.

Wyżej wymienione przetopy jako wynalazek zostały objęte ochroną patentową w roku 2009 [2]. Patent wygasł w roku 2010. Za uzyskany wynalazek została przyznana w roku 2009 zespołowa nagroda Rektora II stopnia oraz wyróżnienie w konkursie Świętokrzyski Racjonalizator.

Istotą drugiej koncepcji było połączenie przetapiania laserowego z wibracją kołową według schematu przedstawionego na rysunku 1. Zgodnie z treścią rysunku, obrabiany materiał jest pobudzany do wibracji kołowych w płaszczyźnie prostopadłej do osi przemieszczającej się wiązki laserowej. Tak zaproponowana konfiguracja powinna wzbudzić następujące zjawiska prowadzące do wzrostu chropowatości przetopionego obszaru:

- uzyskanie przetopienia o rozwinięciu spiralnym w wyniku nałożenia się prostoliniowego ruchu wiązki z ruchem kołowym obrabianego przedmiotu,
- dodatkowa deformacja powierzchni lica przetopu wywołana wzbudzeniem sił odśrodkowych w objętości jeziora płynnego metalu.



Rys. 1. Schemat ideowy przetapiania laserowo-wibracyjnego.

Realizacja idei wykorzystania wibracji kołowej podczas przetapiania laserowego według schematu pokazanego na rysunku 1 doprowadziła do przeprowadzenia określonej ilości badań eksperymentalnych opisanych w jednotematycznym zbiorze prac, których głównym celem naukowym było opracowanie stanowiska laserowo-wibracyjnego przetapiania powierzchni grzejnej elementów metalowych oraz zbadanie wpływu najistotniejszych parametrów przetapiania laserowo-wibracyjnego na chropowatość uzyskanych powierzchni oraz zdolność tych powierzchni do intensyfikacji wymiany ciepła.

## PRZEDMIOT BADAŃ

Do badań wybrano następującą grupę materiałów : stal niestopowa do ulepszenia cieplnego C45, stal nierdzewna 1H18N9T, stal nierdzewna 0H18N9, stop Hastelloy X, stop Haynes-230 oraz stop aluminium Pa38. Skład chemiczny użytych do badań materiałów jest pokazany w tabeli 1.

Pomiary wartości parametrów chropowatości Ra i Sa wykonano w Katedrze Technologii Mechanicznej i Metrologii Politechniki Świętokrzyskiej odpowiednio na profilometrze Talysurf zgodnie z normą PN-ISO 3274: 1997 oraz na profilometrze optycznym Taylor Hopson CCL, zgodnie z normą ISO 25178-2:2012.



Z uwagi na pionierski charakter proponowanego rozwiązania oraz brak jakichkolwiek danych literaturowych dotyczących efektów stosowania wibracji na strukturę przetopień laserowych, przeprowadziłem głównie w celach rozpoznawczych próbną serię eksperymentów (których dokładne wyniki są opisane w artykule [3]) na opracowanym (pilotażowym) prowizorycznym generatorze wibracji kołowych pokazanym na fotografii 1, tworzącym wraz z obrabiarką laserową stanowisko laserowo-wibracyjne przetapiania elementów metalowych. Celem tych badań była weryfikacja powyższych założeń dotyczących spodziewanych efektów wpływu wibracji na proces przetapiania oraz rozpoznanie podstawowych zależności między parametrami obróbki laserowo-wibracyjnej a otrzymanymi kształtami przetopień.

Tabela 1. Skład chemiczny [%] stopów metali użytych w badaniach laserowo-wibracyjnego rozwijania powierzchni.

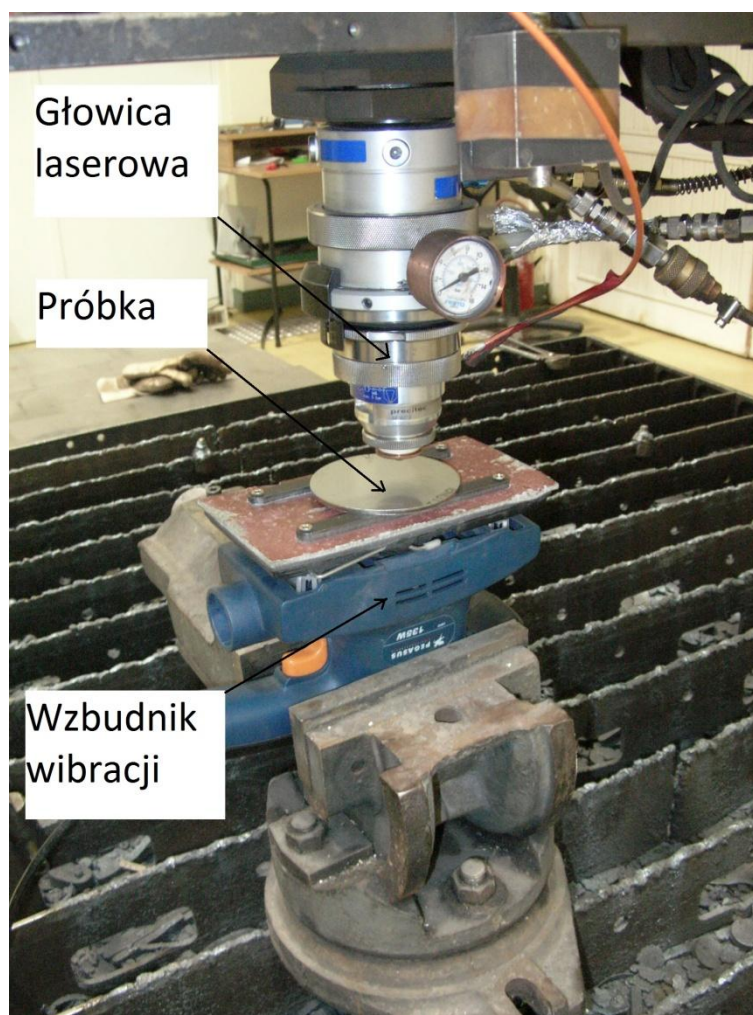
<i>Stal C45 (EN 10083-2)</i>														
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>	<i>Mo</i>							
0.42-0.5	0.5-0.8	max 0.4	max 0.045	max 0.045	max 0.4	max 0.4	max 0.1							
<i>Stal 1H18N9T (PN-71/H-86020)</i>														
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>								
max 0.1	max 2	max 0.8	max 0.045	max 0.030	17 - 19	8 - 10								
<i>Stal OH18N9 (PN-71/H-86020)</i>														
<i>C</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Cr</i>	<i>Ni</i>								
max 0.07	max 2	max 0.8	max 0.045	max 0.03	17	9								
<i>Stal Haynes 230<sup>®</sup></i>														
<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>B</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>	<i>Nb</i>	<i>Al</i>	<i>Ti</i>	<i>C</i>	<i>L</i>	
Reszta	22	14	2	max 3	max 5	max 0.015	0.5	0.4	max 0.5	0.3	max 0.1	0.1	0.02	
<i>Stal Hastelloy X<sup>®</sup></i>														
<i>Ni</i>	<i>Cr</i>	<i>W</i>	<i>Mo</i>	<i>Fe</i>	<i>Co</i>	<i>B</i>	<i>Mn</i>	<i>Si</i>						
Reszta	22	0.6	9	18	1.5	max 0.008	max 1	max 1						
<i>Stop aluminiowy PA38 (PN-79/H-82160)</i>														
<i>Al</i>	<i>Mg</i>	<i>Si</i>	<i>Fe</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>	<i>Cr</i>	<i>Ti</i>	<i>Cu</i>	<i>Inne</i>					
Reszta	0.35-0.6	0.30-0.6	0.10-0.30	max 0.10	max 0.15	max 0.05	max 0.10	max 0.10	max 0.10	max 0.05				

Stanowisko wibracji złożone było z zakupionego egzemplarza szlifierki oscylacyjnej zamocowanej w kleszczach masywnego imadła umieszczonego na stole roboczym obrabiarki laserowej. Według danych producenta zakupiony typ szlifierki generował oscylacje kołowe o średnicy 3 mm ze stałą częstotliwością ok. 100 Hz. W wyniku zastosowania autotransformatora, poprzez zmianę napięcia, zmieniano zakres wibracji od ok. 60 Hz do ok.

110 Hz. Na odpowiednio przekonstruowanej powierzchni roboczej szlifierki jest zamocowany element metalowy przygotowany do przetapiania laserowego. Na pokazanym stanowisku powierzchnia robocza szlifierki wykonuje oscylacje kołowe w płaszczyźnie prostopadłej do osi wiązki laserowej. Mimo tak prostego montażu, stanowisko wibracyjne przez pewien czas pracy utrzymywało w sposób stabilny swoją pozycję umożliwiając wykonanie przetopienia pojedynczej prostoliniowej ścieżki o długości kilku centymetrów. Przed każdą serią przetopień sprawdzane było wypoziomowanie powierzchni roboczej szlifierki oraz w razie potrzeby dokonywano korekty ustawienia szlifierki w imadle.

Na opracowanym stanowisku możliwe było prowadzenie przetopień laserowo-wibracyjnych dla następujących zakresów wartości parametrów obróbki:

- Moc laserowa  $P = 0 \div 6000$  W,
- Prędkość skanowania wiązki  $V = 0 \div 4$  m/min,
- Częstotliwość wibracji  $f = 60 \div 110$  Hz,
- Średnica wibracji  $d = 3$  mm.



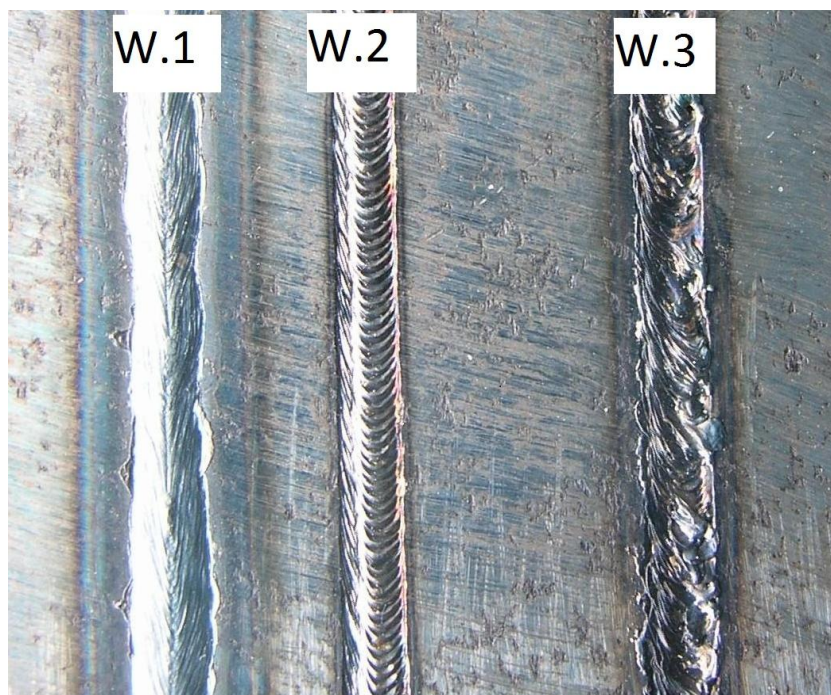
Fot.1. Stanowisko pilotażowe laserowo-wibracyjnego przetapiania elementów Metalowych.

Procesowi wibracyjnego przetapiania poddano płaskie próbki ze stali nierdzewnej 1H18N9T o grubościach 2-3 mm oraz próbki ze stali węglowej C45 o grubości 8 mm. Na każdej z próbek wykonywano po kilka ciągłych prostoliniowych przetopień przy ustalonych parametrach procesowych. W trakcie prób zmiennymi parametrami były: moc lasera  $P$ , prędkość skanowania wiązki laserowej  $V$  oraz częstotliwość wibracji  $f$ . Po każdej serii prób na podstawie wnikliwej analizy wzrokowej otrzymanych struktur ustalano wartości parametrów obróbki dla kolejnej serii przetopień. Po wykonaniu badań eksperymentalnych zmierzono średnią arytmetyczną chropowatość  $Ra$  wybranych powierzchni wzdłuż przetopionych ścieżek w ich płaszczyźnie symetrii. W celach porównawczych przeprowadzono dodatkowo pomiary chropowatości technicznie gładkiej powierzchni stali C45 oraz lica przetopów utworzone bez wibracji. Wartości parametrów obróbki dla obu gatunków stali są zebrane w tabeli 2. W tabeli tej są naniesione również zmierzone wartości parametru  $Ra$ .

Tabela 2. Wynik pomiarów chropowatości.

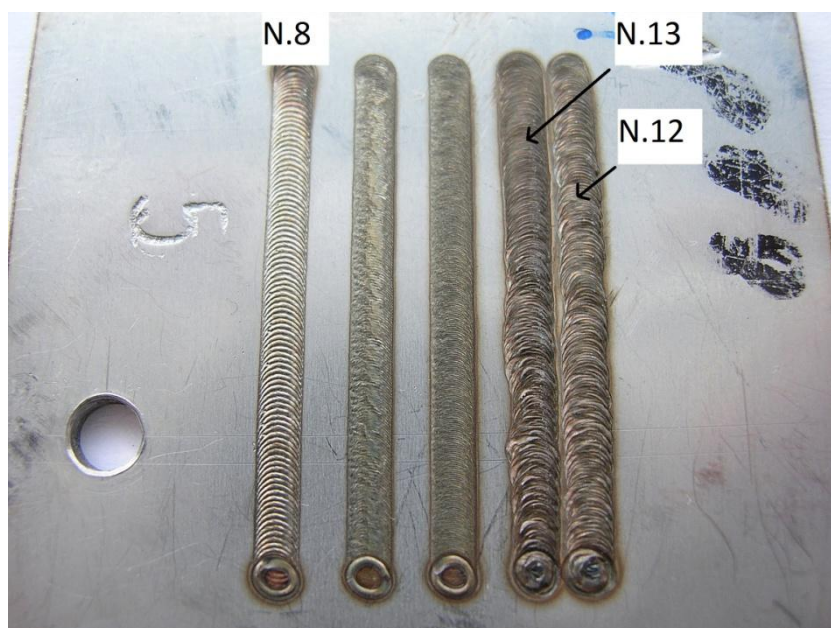
Lp.	Moc lasera $P$ [W]	Prędkość skanowania wiązki $V$ [mm/min]	Częstotliwość wibracji $f$ [1/s]	Parametr chropowatości $Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]
Powierzchnia technicznie gładka ( C45 )				
G.1	0	0	0	0,21
Stal węglowa C45				
W.1	3000	1500	0	2,92
W.2	3000	1500	80	16,10
W.3	3000	1000	80	25,87
Stal nierdzewna 1H18N9T				
N.1	1500	1500	0	3,83
N.2	1500	1500	63	2,94
N.3	2000	2600	63	3,86
N.4	1500	1500	80	4,76
N.5	1500	1000	105	6,67
N.6	2000	2600	110	7,89
N.7	2000	3000	105	8,42
N.8	1500	2000	105	10,30
N.9	3000	3000	105	12,00
N.10	2000	2000	105	12,20
N.11	3000	4000	105	13,50
N.12	1500	1000	105	20,70
N.13	1500	700	105	23,90

Na fotografiach 2 i 3 pokazane są widoki wybranych ścieżek przetopów uzyskanych metodą laserowo-wibracyjną dla próbek ze stali węglowej (fotografia 2), oraz stali nierdzewnej 1H18N9T (fotografia 3).



Fot.2. Widok charakterystycznych laserowych przetopów w obecności wibracji wykonanych na próbce ze stali C45 dla różnych parametrów obróbki. Dodatkowo pokazane jest przetopienie bez wibracji.

Na elemencie ze stali węglowej pokazane jest dodatkowo lico przetopienia bez wibracji. Parametry obróbki przetopów, dla których wykonano pomiary chropowatości są opisane na fotografiach 1 i 2 odpowiednimi liczbami porządkowymi *lp.* z tabeli 1.



Fot.3. Widok charakterystycznych laserowych przetopów w obecności wibracji wykonanych na próbce ze stali 1H18N9T dla różnych parametrów obróbki.



Wyniki badań w postaci zmierzonych wartości parametru  $Ra$  zawartych w tabeli 1 oraz rzeczywistych obrazów wybranych przetopień pokazanych na fotografiach 2 i 3 potwierdziły w pełni słuszność założeń dotyczących spodziewanych efektów zastosowania wibracji kołowej oraz zasygnalizowały możliwość tworzenia pewnej uporządkowanej formy przetopień w postaci następujących po sobie wyraźnie zaokrąglonych mikrożeber. Takie struktury wystąpiły dla stali C45 ( oznaczone na fotografii 2 symbolem W.1 ) oraz dla stali 1H18N9T ( oznaczone na fotografii 3 symbolem N.8 ).

Możliwość rozwijania powierzchni poprzez generowanie przetopień w postaci mikrożeber okazała się kluczowym argumentem przemawiającym do podjęcia działań na rzecz kontynuacji badań oraz objęcia ochroną patentową zaproponowanej metody laserowo-wibracyjnego przetapiania powierzchni elementów metalowych. Wynikało to z faktu, iż mikrozebra charakteryzują się zdolnością do znacznej intensyfikacji wymiany ciepła. Z tego powodu są one pospolicie wykorzystywane w warunkach przemysłowych.

W wyniku podjętych działań, zaproponowany sposób modyfikacji powierzchni metalowych jako metoda zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych uzyskał ochronę patentową w następstwie udzielenia dwóch patentów krajowych PL207358 [4] oraz PL 210889 [5]. Dzięki udzielonemu wsparciu finansowemu w postaci grantów przyznanych mi przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego (Grant Patent Plus) oraz Ośrodek Przetwarzania Informacji, dokonano rozszerzenia zakresu ochrony patentowej na Ukrainę ( Patent ukraiński nr 103770 ) oraz wybrane kraje Unii Europejskiej ( Patent Europejski nr 2521798 [6]).

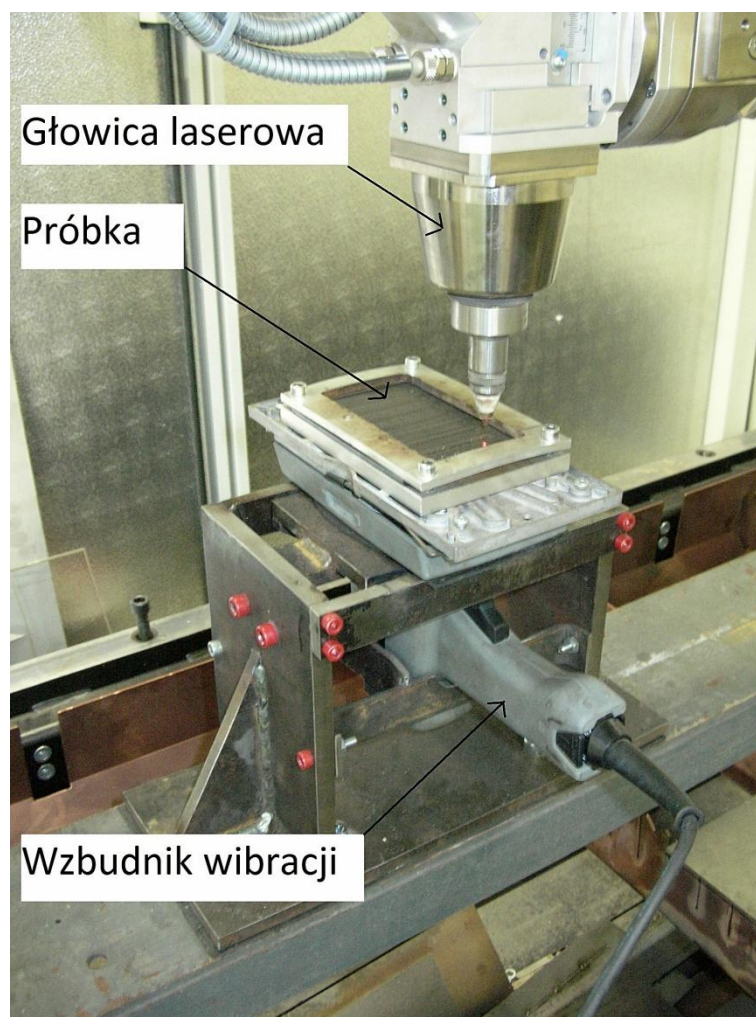
Zaproponowana metoda, jako wynalazek została również wyróżniona licznymi nagrodami na szczeblu uczelnianym, samorządowym, ministerialnym oraz międzynarodowym :

- zespołowa nagroda Rektora II stopnia (2011)
- Nagroda Główna w konkursie Świętokrzyski Racjonalizator, Kielce (2012)
- List Gratulacyjny Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego, Warszawa (2010)
- srebrny medal za wynalazek „ Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na Międzynarodowej Wystawie Wynalazków i Innowacji, Warszawa, (2010)
- srebrny medal za wynalazek „ Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na 62 Międzynarodowej Wystawie Pomysły, Wynalazki, Nowe Produkty iENA, Norymberga, Niemcy (2010)
- srebrny medal za wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na Międzynarodowym Salonie Wynalazczości Concours-Lepine, , Paryż, Francja (2011)

Pozytywne wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań pilotażowych doprowadziły do opracowania przeze mnie wniosku badawczego dotyczącego kontynuacji badań nad efektywnością rozwijania powierzchni za pomocą obróbki laserowo-wibracyjnego przetapiania elementów metalowych. W opracowanym wniosku zaplanowane było również wykonanie wstępnych badań wyznaczenia współczynnika wymiany ciepła podczas wrzenia objętościowego. Wniosek został zaakceptowany do finansowania przez Narodowe Centrum

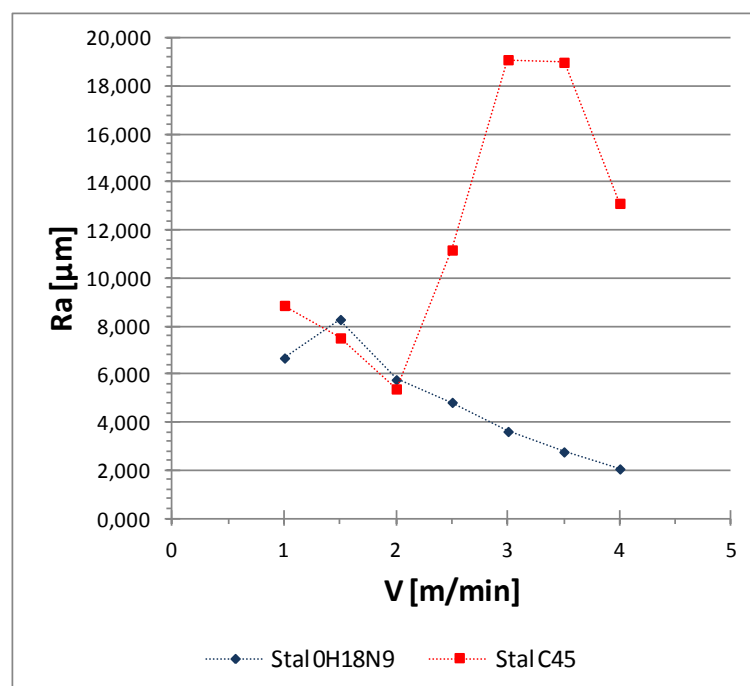
Nauki w ramach przyznanego grantu nr NN 503 199440 „Wykorzystanie laserowego przetapiania w obecności wibracji do zwiększenia powierzchni wymiany ciepła”. Okres realizacji grantu przewidziany był na lata 2011-2012 ( 12 miesięcy ). W wyniku zaistnienia przejściowych utrudnień w korzystaniu z infrastruktury laboratoryjnej uczelni, realizację grantu zakończono w roku 2013.

W ramach przyznanego finansowania przeprowadziłem znaczną ilość prób eksperymentalnych przetapiania laserowo-wibracyjnego na zmodernizowanym stanowisku wibracyjnym pokazanym na fotografii 4. Masywna konstrukcja obudowy wraz z odpowiednio zaprojektowanym systemem mocowań wzбудnika wibracji gwarantowała utrzymanie stabilnych parametrów wibracji praktycznie przez dowolnie zadany czas działania. Do generowania wibracji wykorzystałem nowo zakupiony egzemplarz szlifierki o podobnych parametrach wibracji: średnica wibracji  $d = 3$  mm, częstotliwość wibracji ok. 105 Hz. Parametry wibracji były niezmiennie podczas prowadzonych eksperymentów. Do badań wykorzystano nowoczesne stanowisko obrabiarki laserowej Lasercell 1005.



Fot.4. Zmodernizowane stanowisko laserowo-wibracyjnego przetapiania elementów metalowych.

Do badań włączyłem następującą grupę materiałów : stal C45, stal nierdzewna 0H18N9 oraz aluminium stopowe Pa38.



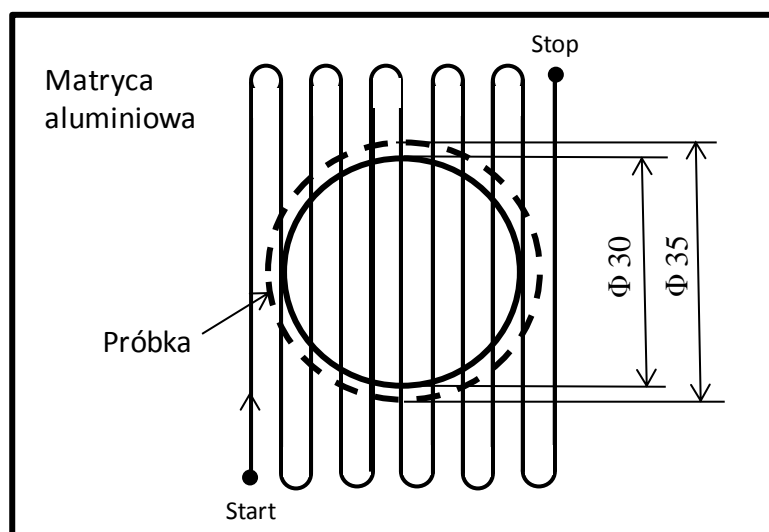
Rys.2. Porównanie zmierzonych wartości  $Ra$  w funkcji prędkości skanowania  $V$  dla stali C45 oraz 0H18N9. Moc lasera  $P = 1500$  W.

W wyniku przeprowadzonych licznych prób eksperymentalnych na wyżej wymienionych materiałach otrzymałem przebiegi zmian kształtu przetopień oraz zmian chropowatości mierzonych parametrem  $Ra$  w zależności od parametrów obróbki laserowej : prędkości skanowania wiązki laserowej  $V$ , mocy laserowej  $P$ . W publikacjach [7, 8, 9] będących efektem częściowej realizacji projektu badawczego, przedstawiłem i opisałem dokładnie zmiany struktury przetopień wykonanych na próbkach ze stopu aluminium Pa38, stali C45 oraz stali 0H18N9, na podstawie powiększeń mikroskopowych wybranych fragmentów przetopionych ścieżek laserowych. Następnie przedstawiłem w formie wykresów przebiegi zmian zmierzonych wartości parametru  $Ra$  w zależności od parametrów  $V$  i  $P$ . Na podstawie analizy wykresów ustaliłem, iż wpływ prędkości skanowania wiązki laserowej  $V$  oraz mocy laserowej  $P$  na stopień schropowacenia przetopionych powierzchni silnie zależy od właściwości obrabianego materiału. Szczególnie zostało to uwidocznione w przypadku stali C45 oraz 0H18N9. Na rysunku 2 są zamieszczone wykresy zmierzonych wartości parametru  $Ra$  dla obu stali, które były poddane obróbce laserowo-wibracyjnego przetapiania w identycznych warunkach eksperymentalnych. Widać wyraźnie iż wykresy te znacznie różnią się od siebie. Otrzymane wyniki sygnalizują, iż np. próby prognozowania efektów przetapiania laserowo-wibracyjnego na podstawie uzyskanych wyników z innych materiałów mogą być obarczone dużym błędem.

Uzyskany znaczny wzrost chropowatości obróbką laserowo-wibracyjną otrzymanych struktur oraz szerokie możliwości sterowania wartościami parametru  $Ra$  poprzez zmiany parametrów  $P$  i  $V$  potwierdziły celowość wykonania wstępnych badań (ujętych w harmonogramie wykonania grantu) nad efektywnością intensyfikacji wymiany ciepła. Wyniki tych badań są przedstawione w publikacji [9].

Pomiary intensyfikacji wymiany ciepła były wykonane w Katedrze Maszyn Ciepłych i Przepływowych Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Badania pomiarowe przeprowadzono dla próbek wykonanych ze stali nierdzewnej 0H18N9 podczas wymiany ciepła w obecności wrzenia pęcherzykowego wody destylowanej pod ciśnieniem atmosferycznym. Powierzchnie grzejne próbek usytuowane były w pozycji horyzontalnej.

Próbki przeznaczone do badań cieplnych wycięte były z arkusza stali w postaci krążków o grubości 3 mm i średnicy 35 mm. Jedna z powierzchni krążków przeznaczona do teksturowania (powierzchnia robocza) była przetoczona do średnicy 30 mm na grubości 1 mm. Próbki były umieszczane pod aluminiową matrycą z wykonanym otworem o średnicy 30 mm zamocowanej w imadle generatora wibracji. Proces przetapiania laserowo-wibracyjnego powierzchni roboczych próbek odbywał się według odpowiednio zaprogramowanej trajektorii ruchu głowicy laserowej pokazanej na rysunku 3. Dla tak zaprojektowanej trajektorii, matryca pełniła rolę ochronną nie dopuszczając do przypadkowego uszkodzenia brzegów próbek.



Rys.3. Schemat ideowy przetapiania laserowo-wibracyjnego okrągłych próbek.

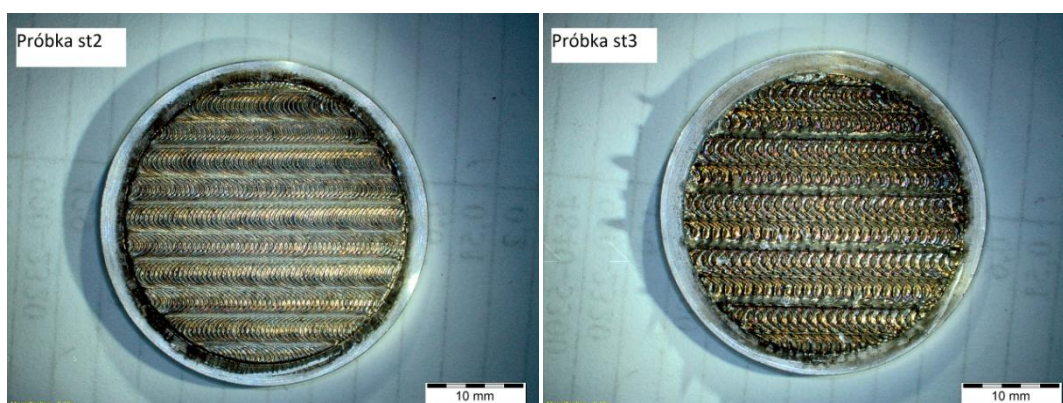
Rozwijanie przeprowadzono dla dwóch zestawów parametrów obróbki laserowej pokazanych w tabeli 3 wraz ze zmierzonymi wartościami  $\overline{Ra}$  i  $\overline{Sa}$ . Do badań włączono również próbkę nieobrobioną oznaczoną jako *st1*. Pełniła ona rolę próbki odniesienia w badaniach pomiarowych.



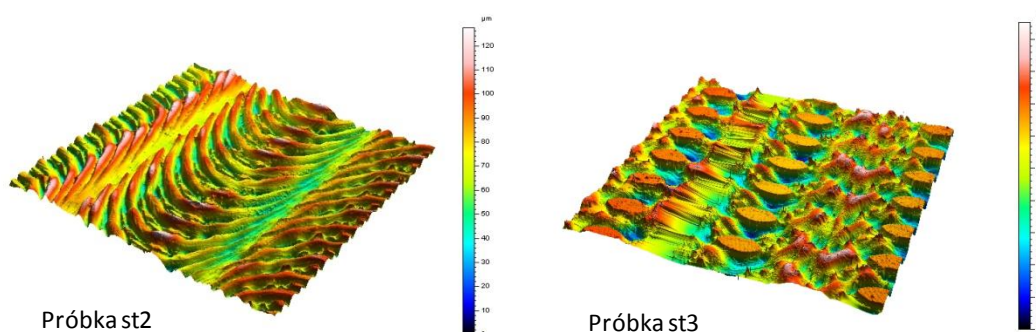
Tabela 3. Parametry obróbki laserowo-wibracyjnej dla stali OH18N9

Nr Próbki	Prędkość $V$ [m/min]	Moc lasera $P$ [W]	Częstotli- wość wibracji $f$ [Hz]	$\overline{Ra} \pm \sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]	$\overline{Sa} \pm \sigma$ [ $\mu\text{m}$ ]
st1	Powierzchnia technicznie gładka			0.528±0.046	0.623±0.061
st2	2	2000	105	9.637±0.279	13,603±1,107
st3	4	3000	105	25.709±0.742	28,094±0,693

Fotografie otrzymanych tekstur laserowo-wibracyjnym przetapianiem są przedstawione na fotografii 5, a na rysunku 4 odpowiednio profilogramy 3D fragmentów powierzchni.

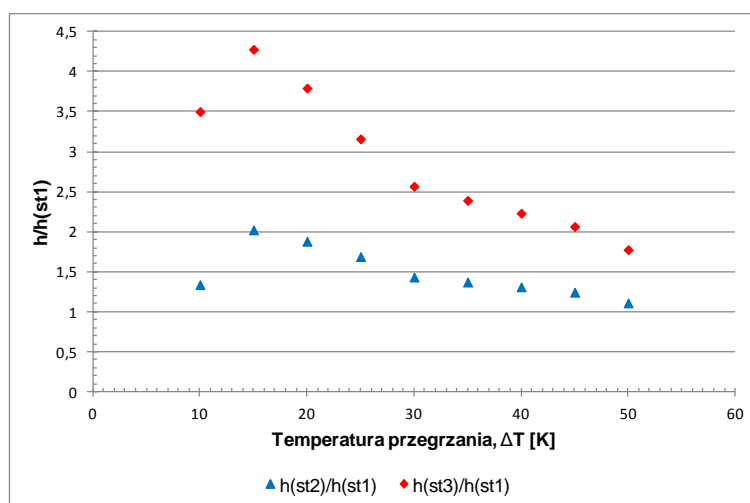


Fot.5. Widok przetopień laserowo-wibracyjnych wykonanych zgodnie ze schematem z rysunku 3 i parametrami procesowymi zawartymi w tabeli 3.



Rys.4. Profilogramy 3D fragmentów powierzchni próbek pokazanych na fotografii 5.

Wykonane badania pomiarowe intensyfikacji wymiany ciepła ujawniły znaczący wpływ rozwinięcia powierzchni grzejnej próbki st3 na wzrost współczynnika wymiany ciepła  $h$ . Na rysunku 5, na którym przedstawione są wykresy zmian wartości wsp.  $h$  badanych próbek w stosunku do wsp.  $h$  powierzchni technicznie gładkiej widać, iż dla temperatury przegrzania  $\Delta T$  równej około 15 K wartość wsp.  $h$  jest ponad czterokrotnie większa od wartości wsp.  $h$  dla powierzchni technicznie gładkiej. W przypadku próbki st2 rozwinięta powierzchnia grzejna podnosi wartość wsp.  $h$  dwukrotnie.

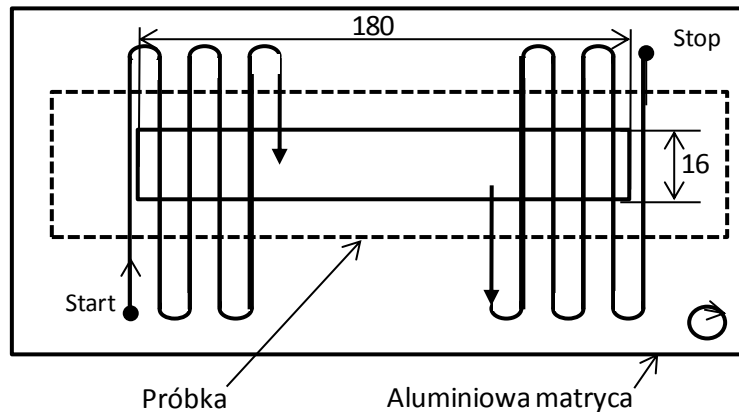


Rys.5. Zmiana wartości wsp. wymiany ciepła  $h$  badanych próbek w stosunku do wsp. wymiany ciepła  $h$  powierzchni technicznie gładkiej

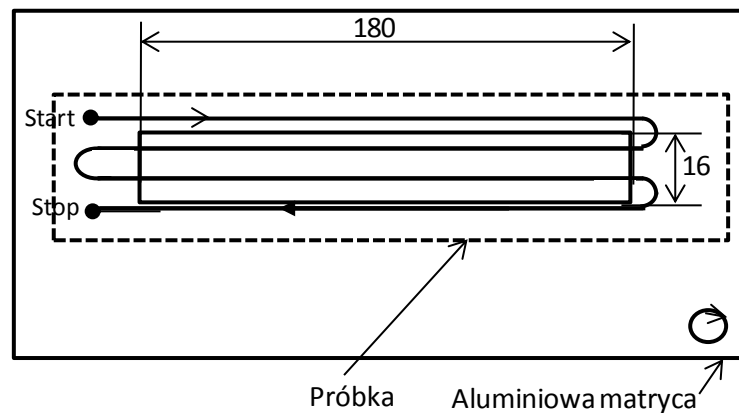
Po wykonaniu badań pomiarowych wymiany ciepła, koncepcja obróbki laserowo-wibracyjnego rozwijania powierzchni grzejnych została zaprezentowana na wystawie polskiej myśli innowacyjnej w ramach imprezy ‘Dni Polskie’ pod hasłem ‘Festiwal nowych technologii – odkryj Polskę’ organizowanej w Turynie we Włoszech ( 6-12 XI 2013 r. ) przez Ambasadę RP w Rzymie oraz Polską Akademię Nauk.

Uzyskane przeze mnie pozytywne wyniki powyższych badań doprowadziły do nawiązania współpracy naukowej z Katedrą Mechaniki Politechniki Świętokrzyskiej, w której realizowany był projekt badawczy NCN, nr UMO 2013/09/B/ST8/02825, pt. *Wpływ rozwiniętych powierzchni grzejnych na wymianę ciepła przy wrzeniu w przepływie przez mini przestrzenie*, czas trwania projektu: 07.03.2014 - 06.03.2017. Kierownikiem grantu była dr hab. inż. Magdalena Piasecka, prof. PŚk. W efekcie podjętej współpracy zostałem dołączony do zespołu badawczego grantu w charakterze wykonawcy. Realizacja projektu badawczego przewidywała analizę efektywności wymiany ciepła podczas przepływu wrzącego płynu przez wymiennik ciepła z minikanalami o przekroju prostokątnym. Minikanaly posiadały rozwiniętą powierzchnię grzejną o różnym stopniu rozwinięcia. Jednymi z najbardziej efektywnych powierzchni, którym towarzyszyła najbardziej intensywna wymiana ciepła, okazały się powierzchnie teksturowane laserowo-wibracyjnie. W ramach ustalonego harmonogramu badań wytworzyłem za pomocą obróbki laserowo-wibracyjnej rozwinięcia powierzchni grzejnych dla dwóch materiałów płyt grzejnych: stopu

Hastelloy X o grubości 0.65 mm oraz stopu Haynes-230 o grubości 0.45 mm. Sposób teksturowania powierzchni wybranych materiałów jest pokazany na rysunkach 6 i 7. Próbki przeznaczone do teksturowania były umieszczone pod aluminiową matrycą z wydrążonym okienkiem. Zadaniem matrycy było tutaj umożliwienie wykonania przetopień w ściśle określonym miejscu na powierzchni próbki. Proces przetapiania laserowo-wibracyjnego odbywał się według odpowiednio zaprogramowanych trajektorii ruchu głowicy laserowej.



Rys. 6. Schemat ideowy przetapiania próbki ze stopu Hastelloy X.

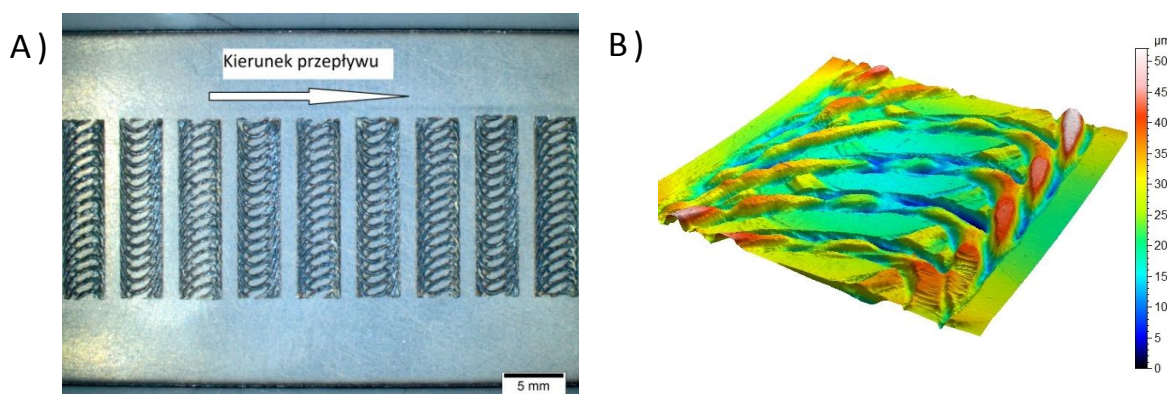


Rys.7. Schemat ideowy przetapiania próbek ze stopu Haynes-230.

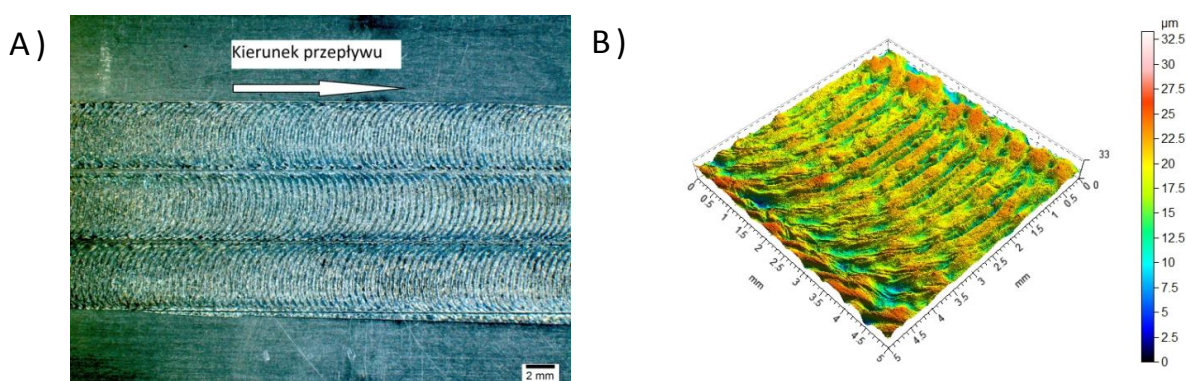
Serie przetopień laserowo-wibracyjnych prowadzono przy parametrach obróbczych zebranych w tabeli 4. Przykłady wykonanych obróbek teksturowania laserowo-wibracyjnego są pokazane na rysunkach 8, 9, 10.

Tabela 4. Parametry obróbki laserowo-wibracyjnej

Materiał	Prędkość $V$ [m/min]	Moc lasera $P$ [W]	Częstotli- wość wibracji $f$ [Hz]
Haynes-230	5	1500	105
	2.5	1250	105
Hastelloy X	4	2500	105

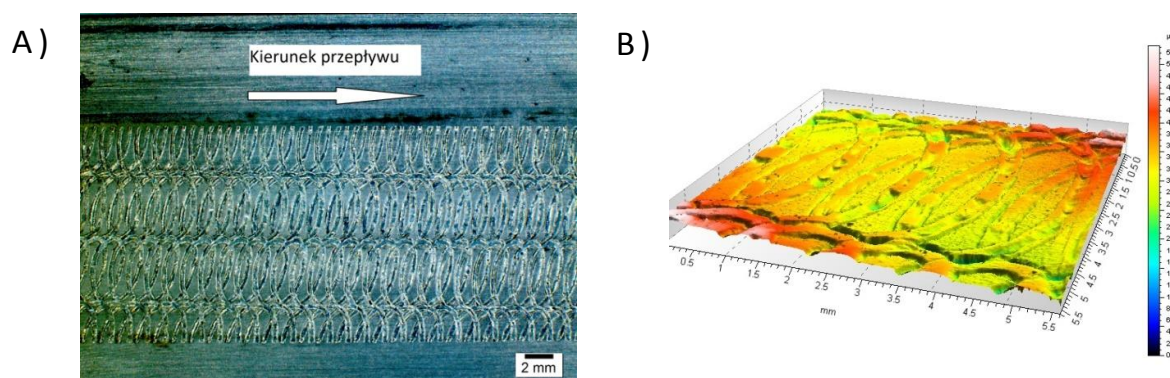


Rys.8. Obraz (powiększenie mikroskopowe) fragmentu uzyskanych przetopień (A); topografia powierzchni 3D pojedynczej ścieżki laserowej (B). Materiał : stop Hastelloy X.



Rys.9. Obraz (powiększenie mikroskopowe) fragmentu uzyskanych przetopień (A); topografia powierzchni 3D pojedynczej ścieżki laserowej (B). Materiał : stop Haynes-230, moc laserowa  $P = 1250$  W, prędkość skanowania wiązki laserowej  $V = 2.5$  m/min.





Rys.10. Obraz (powiększenie mikroskopowe) fragmentu uzyskanych przetopień (A); topografia powierzchni 3D pojedynczej ścieżki laserowej (B). Materiał : stop Haynes-230, moc laserowa  $P = 2500$  W, prędkość skanowania wiązki laserowej  $V = 4$  m/min.

Wytworzone powierzchnie grzejne zostały poddane badaniom wymiany ciepła podczas wrzenia płynu chłodniczego FC-72 przepływającego przez minikanal usytuowany w pozycji pionowej. Badania prowadzono dla wrzenia podczas przepływu czynnika w obszarze wrzenia przechłodzonego oraz nasyconego. Orientacyjne wyniki badań są przedstawione w tabeli 5. Uśrednione wartości współczynników przyjmowania ciepła zostały wyliczone na podstawie lokalnych wartości współczynników wyznaczonych na podstawie rezultatów badań eksperymentalnych z wykorzystaniem powierzchni grzejnych rozwiniętych teksturowaniem laserowo-wibracyjnym.

Tabela 5. Efektywność wymiany ciepła rozwiniętych powierzchni teksturowaniem laserowo-wibracyjnym w obszarach wrzenia przechłodzonego i nasyconego [10, 11, 12].

Materiał	Moc lasera $P$ [W]	Prędkość skanowania $V$ [m/min]	Zmiana uśrednionej wartości wsp. wymiany ciepła $h$ w stosunku do powierzchni technicznie gładkiej	
			Wrzenie przechłodzone	Wrzenie nasycone
Haynes-230	1500	5	Nieznaczące zmiany (spadek)	Dla strumienia cieplnego $q_w = 108.169$ kW/m <sup>2</sup> zanotowano maksymalny ponad <b>4.5-krotny</b> wzrost w porównaniu z powierzchnią technicznie gładką
	1250	2.5	Nieznaczące zmiany (spadek)	Niemożliwość wykonania pomiarów z uwagi na duże fluktuacje temperatury
Hastelloy X	2500	4	Nieznaczące zmiany (spadek)	Dla strumienia cieplnego $q_w = 89.5$ kW/m <sup>2</sup> zanotowano maksymalny około <b>4-krotny</b> wzrost w porównaniu z powierzchnią technicznie gładką.

## WNIOSKI

Szczegółowe wnioski dotyczące oceny proponowanej technologii pod kątem otrzymanych charakterystyk stereometrycznych tekstur powierzchniowych oraz efektywności wymiany ciepła są zawarte w artykułach stanowiących monotematyczny cykl publikacji naukowych. W związku z tym chciałbym skupić się na wnioskach ogólnych, spostrzeżeniach stanowiących o atrakcyjności opracowanej przeze mnie technologii pod kątem użytkowym i poznawczym. Przede wszystkim należy zauważyć, iż na tym etapie prowadzonych badań, pomiary efektywności intensyfikacji wymiany wykonano dla bardzo ograniczonej liczby wytworzonych rozwinięć powierzchni grzejnych w ilości pięciu sztuk. Mimo tak ograniczonej liczby przebadanych powierzchni, uzyskano w trzech przypadkach znaczący wzrost intensyfikacji wymiany ciepła. Wzrost ten wystąpił w przypadku wrzenia objętościowego jak również w przypadku wrzenia w przepływie w obszarze wrzenia nasyconego. Jest to bardzo korzystna cecha, gdyż generalnie podczas wrzenia w przepływie w obszarze wrzenia nasyconego czy wrzenia objętościowego, współczynniki przejmowania ciepła osiągają znacznie wyższe wartości w porównaniu z obszarem wrzenia przechłodzonego. Z tego powodu do intensyfikacji wymiany ciepła wykorzystuje się głównie zjawisko wrzenia w objętości i w przepływie w obszarze wrzenia nasyconego. Uzyskane maksymalne wzrosty wartości współczynników wymiany dla wrzenia objętościowego i przepływowego nasyconego w stosunku do powierzchni technicznie gładkiej dorównują wzrostom uzyskiwanym dla przemysłowo wytwarzanych powierzchni grzejnych. Świadczyć to może o ogromnym potencjale opracowanej technologii do rozwijania powierzchni grzejnych charakteryzujących się wysoką efektywnością wymiany ciepła. Jest to pierwsza technologia rozwijania powierzchni z udziałem obróbki laserowej, która przełamuje barierę dwukrotnego wzrostu wartości współczynnika przejmowania ciepła.

Inną znaczącą zaletą opracowanej przeze mnie technologii jest sposób rozwijania powierzchni wymiany ciepła. Atrakcyjność tej technologii wynika głównie z zalet stosowania obrabiarek laserowych. Do najważniejszych zalet można zaliczyć :

- możliwość rozwijania powierzchni bez udziału obróbek mechanicznych (brak kontaminacji materiału narzędziem obróbczym),
- krótki cykl operacji wytwarzania struktur,
- możliwość wykonywania przetopów o różnych parametrach geometrycznych w jednej operacji i według dowolnie zaprojektowanych trajektorii,
- możliwość wykonania lokalnych przetopów z dużą dokładnością,
- duża elastyczność i wysoka automatyzacja procesu,
- brak oporu cieplnego między wytworzonymi strukturami a materiałem macierzystym.
- relatywnie niskie koszty wytwarzania

Uważam, iż stanowi to silną motywację do prowadzenia dalszych, pogłębionych badań nad poszukiwaniem optymalnej geometrii tekstur powierzchniowych zapewniających osiągnięcie najwyższych wartości współczynnika przejmowania ciepła.

Mając na uwadze wymienione powyżej zalety, opracowana przeze mnie technologia laserowo-wibracyjnego przetapiania może już obecnie stanowić alternatywę aplikacyjną w pewnych obszarach zastosowań w stosunku do technologii rozwijania powierzchni grzejnych opartych głównie na obróbkach mechanicznych, które są generalnie skomplikowane i kosztowne. Obszarem zastosowań może być np. wytwarzanie płyt grzejnych dla kompaktowych wymienników ciepła, czy wytwarzanie wybranych elementów rurek cieplnych.

Badania eksperymentalne wymiany ciepła podczas wrzenia w przepływie na powierzchniach grzejnych rozwiniętych obróbką laserowo-wibracyjnego przetapiania są kontynuowane przez panią mgr inż. Kingę Strąk, w ramach przygotowywanej przez nią pracy doktorskiej pt. „Badania intensyfikacji wrzenia podczas przepływu przez minikanaly prostokątne” pod kierunkiem dr hab. inż. Magdaleny Piaseckiej, prof. PŚk.

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych.

Pracując we Francji w jednym z przedsiębiorstw w charakterze laboranta-chemika zakwalifikowałem się w roku 1990 na drodze konkursu na studia doktoranckie w Narodowym Instytucie Nauk Stosowanych w Lionie we Francji. Pracę doktorską pt. „*Wpływ głębokości spawu wykonanego metodą laserową na temperatury powierzchniowe*” zleconą i finansowaną przez Zakłady Samochodowe Renault w Paryżu, wykonałem pod kierunkiem profesora Michel'a Laurent'a, dyrektora Laboratorium Fizyki Przemysłowej.

Celem pracy była analiza możliwości zastosowania jednopunktowego pomiaru temperatury na powierzchni spoiny za jeziorkiem spawalniczym do kontrolowania na bieżąco penetracji kanałika parowego podczas spawania laserowego głębokich elementów silnika spalinowego. Na podstawie wyników przeprowadzonego przeglądu literatury okazało się, że praca będzie miała charakter pionierski. Praktycznie jedynym materiałem naukowym nawiązującym istotnie do tematu mojej pracy doktorskiej był patent amerykański dotyczący kontroli jakości spawu poprzez jednopunktowy pomiar temperatury spoiny. Mając to na uwadze wybrano koncepcję pracy polegającą na przeprowadzeniu analizy porównawczej powierzchniowych pól temperatur uzyskanych z badań eksperymentalno-pomiarowych oraz teoretycznych. W części teoretycznej badań, temperatury powierzchniowe były obliczane za pomocą zaproponowanego przeze mnie nowatorskiego kondukcyjnego modelu spawania laserowego, który łącząc prostotę pozwalał jednocześnie na uwzględnienie w obliczeniach istotnych parametrów spawania laserowego, w tym głębokości kanałika parowego. W części eksperymentalnej temperatury na spoinie były mierzone za pomocą kamer termowizyjnych o omiataniu liniowym i powierzchniowym oraz termoelementów. Eksperymenty spawania laserowego wykonano w Centrum Laserowej Obróbki Materiałów CALFETMAT w Lionie na laserze CILAS o mocy 4 MW, oraz w Laserowym Laboratorium Badawczym Zakładów Renault w Paryżu na laserze Triumph o mocy 6.5 kW.

Na podstawie analizy porównawczej tak otrzymanych wyników wybrana koncepcja badań okazała się trafna. Uzyskałem wiele nowych często zaskakujących wyników dotyczących zachowania się cieplnego spawanego laserowo materiału. Na ich podstawie wykazałem nieadekwatność wykorzystania jednopunktowego pomiaru temperatury do kontrolowania jakości spawania laserowego. W zamian zaproponowałem metodę kontroli jakości spawania laserowego polegającą na dwupunktowym pomiarze temperatur spawanego laserowo materiału. Wykazałem również, iż za pomocą zaproponowanego przeze mnie kondukcyjnego modelu spawania laserowego można określić optymalne położenie jednego z punktów pomiarowych, przy którym uzyskuje się najwyższą czułość zmian temperatury na zmiany głębokości penetracji kanalika parowego.

Po powrocie do kraju podjąłem pracę w Samodzielnej Pracowni Technologicznych Zastosowań Laserów w instytucie Podstawowych Problemów Techniki w Warszawie, a następnie w Centrum Laserowych Technologii Metali Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach. Kontynuowałem prace naukowe w zakresie modelowania pól temperatur w spawanym materiale. W efekcie podjętych działań opracowałem ulepszony kondukcyjny model spawania laserowego, w którym energia wiązki laserowej rozłożona jest w kanaliku parowym zgodnie z prawem Beera-Lamberta. Wprowadzenie do modelu zjawiska tłumienia energii wiązki laserowej jest istotne z punktu widzenia zwiększenia dokładności modelowania pól temperatur w spawanym laserowo materiale. Opracowany model był wykorzystywany przeze mnie w badaniach dotyczących modelowania pól temperatur oraz kształtu spoin tworzonych podczas spawania laserowego jak również służył celom dydaktycznym podczas zajęć specjalistycznych prowadzonych dla studentów specjalności Komputerowo wspomagane technologie laserowe i plazmowe.

Kilkuletnie doświadczenie zdobyte w wyniku prowadzonych badań zostało docenione poprzez zaangażowanie mnie do realizacji grantu wdrożeniowego "**Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska**" przyznanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, którego kierownikiem był Prof. dr hab. inż. Bogdan Antoszewski. W realizowanym projekcie pełniłem funkcję głównego wykonawcy w charakterze kierownika grupy zadaniowej. Byłem odpowiedzialny za część badań, których celem było opracowanie technologii pozwalającej na wydłużenie czasu eksploatacji do minimum 3000 godzin świec zapłonowych stosowanych do spalania biogazu. Odbiorcą technologii były Zakłady Precyzyjne Iskra w Kielcach, które są producentem świec zapłonowych. Podstawowym celem opracowanej technologii miało być zwiększenie konkurencyjności zakładu w produkcji świec zapłonowych przeznaczonych do stosowania w generatorach prądu opartych na silnikach spalinowych zasilanych biogazem. Kierowałem interdyscyplinarnym zespołem badawczym złożonym z pracowników naukowych pochodzących z różnych uczelni oraz wydelegowanych pracowników Zakładów Precyzyjnych Iskra.

W efekcie podjętych prac badawczych przez kierowany przeze mnie zespół, osiągnięto założony cel. Cel osiągnięto w następstwie opanowania mikrospawania laserowego wstępnie podgrzewanych nakładek irydowych świec zapłonowych z elektrodą rdzeniową. Opracowana



technologia jest wykorzystywana obecnie przez Zakłady Precyzyjne Iskra przy produkcji wybranych typów świec zapłonowych.

Innym osiągnięciem naukowym jest opracowanie przeze mnie nowatorskiego stanowiska do pomiarów pirometrycznych temperatury próbek wykorzystywanych w metodzie termometrycznej wyznaczania zaabsorbowanej energii spawania laserowego. Opracowane stanowisko odznacza się pewnymi zaletami ułatwiającymi pomiary temperatur oraz zwiększającymi ich dokładność. Pełny opis stanowiska pomiarowego wraz z analizą wyników pomiarowych jest przedstawiony w moim artykule pt. „*Pyrometric temperature measurements with miniature cavity used as a blackbody in the calorimetric method for determining absorbed laser energy*”.

#### **5.1. Publikacje naukowe w czasopismach z bazy Journal Citation Reports (JCR) po uzyskaniu stopnia doktora nie wchodzące w skład osiągnięcia naukowego wymienionego w punkcie 4a.**

1. B. Grabas, E. Mazur, *Obliczenia teoretyczne kształtu laserowej spoiny punktowej*, Przegląd Elektrotechniczny, 84, 7, 126-128, 2008 ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 10, impact factor w roku wydania: 0 )
2. B. Grabas, *Pyrometric temperature measurements with miniature cavity used as a blackbody in the calorimetric method for determining absorbed laser energy*. Exp. Therm. Fluid Sci., 74, 100-109, 2016. ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 35, impact factor w roku wydania: 2,83 )
3. B. Grabas, Sz. Tofil, W. Napadłek, *An analysis of laser welded NiCr-Pt micro joints on spark plug electrodes in biogas-fuelled engines*, Arch. Metall. Mater., 61, 2, 1163-1167, 2016. ( Lista A MNiSW, liczba punktów w roku wydania: 0, impact factor w roku wydania: 0,571 )

#### **5.2. Autorstwo lub współautorstwo monografii, publikacji naukowych w czasopismach międzynarodowych lub krajowych innych niż znajdujące się w bazach lub na listach, o których mowa w punktach 4B i 5.1**

##### **a) Rozdziały w monografiach**

1. Bogusław Grabas, Szymon Tofil, *Mikrospawanie laserowe nakładek irydowych na elektrodę rdzeniową świecy zapłonowej*, w monografii: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych, 91-98, 2014.
2. Szymon Tofil, Bogusław Grabas, Wojciech Napadłek, *Badanie laserowo spawanych mikrozłączy NiCr-Ir, NiCr-Pt na elektrodach świec zapłonowych pracujących w silnikach zasilanych biogazem*, w monografii: Prace szkoły inżynierii materiałowej, 188-192, 2015.

3. Szymon Tofil, Bogusław Grabas, *Badanie trwałości złączy NiCr-Ir oraz NiCr-Pt mikrospawanych laserem Nd:YAG na elektrodach świec zapłonowych pracujących w silnikach zasilanych biogazem*, w monografii: Nowoczesne zastosowania technologii spawalniczych, 95-104, 2015.

**b) Publikacja w recenzowanych czasopismach wymienionym w wykazie ministra MNiSzW (część B)**

1. Bogusław Grabas, *Prediction of the fused zone shape of welds in butt laser keyhole welding*, Journal of Technical Physics, 271-276, 1999
2. A. Pokhmurska, Z. Mucha, B. Grabas, R. Gradoń, R. Krupa, *Mikrostruktura stopu tytanu po laserowym formowaniu*, Inżynieria Materiałowa, 21, 6, 395-396, 2000.
3. B. Grabas, *Modelowanie profili spawu laserowego*, Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Elektryka Zeszyt: 40, 129-137, 2002.
4. B. Grabas, *Wpływ głębokości spawania laserowego na rozkład temperatur powierzchniowych za jeziorkiem spawalniczym*, Mechanik, 12, 871-877, 2004.
5. B. Grabas, M. Najgeburska, Ł. Śliwka, M. Maj, *Wpływ temperatury i prędkości skanowania na szerokość ścieżki zahartowanej wiązką laserową*, Mechanik, 11, 951-953, 2008.

**c) Publikacje w materiałach konferencyjnych**

1. B. Grabas, Sz. Tofil, *The use of laser micro-welding to increase the durability of spark plugs with iridium-tipped electrodes operating in biogas-fuelled engines* Materiały konferencyjne International Conference "MODERN LASER APPLICATIONS" 4th Edition INDLAS 2014, Strony: 1-n, 2014.
2. Bogusław Grabas, *Method for enhancing heat transfer in the active surface of metal elements*, New technologies - discover Poland, Strony: 26, 2013.
3. Bogusław Grabas, Magdalena Najgeburska, Łukasz Śliwka, Magdalena Maj, *Influence of surface heating level and scanning velocity on the hardened by laser track width* Proceedings of SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007.
4. Bogusław Grabas, Ewelina Mazur, *Modelowanie profili spawu laserowego punktowego w czasopiśmie*: Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Nauki Techniczne Zeszyt: 5, 217-224, 2007.
5. Bogusław Grabas, *The use of conduction model in laser weld profile computation* Proceedings of SPIE - Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2007

6. Bogusław Grabas, Magdalena Najgeburska, Łukasz Śliwka, Magdalena Maj, ***Wpływ temperatury i prędkości skanowania na geometrię laserowo zahartowanej ścieżki*** Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej, Zeszyt: 2, 2006
7. Bogusław Grabas, Magdalena Najgeburska, Łukasz Śliwka, Magdalena Maj, ***Wpływ maksymalnej temperatury powierzchniowej i prędkości skanowania na szerokość zahartowanej laserowo ścieżki***, Konferencja - Badania Mechanicznych Właściwości Materiałów i Konstrukcji, 335-344, 2005
8. Bogusław Grabas, ***Wykorzystanie cieplnego modelu kondukcyjnego do modelowania profili spoin laserowych***, XV Międzynarodowa Konferencja: Spawanie w energetyce 22-24 IX 2004, Kielce, 123-130, 2004.
9. B. Grabas, ***Impact of temperature sensors location on the quality of control in laser welding***, LASER TECHNOLOGY VII: APPLICATIONS OF LASERS, Zeszyt: 5229, 223-227, 2003.
10. B. Grabas, ***Infrared thermography in monitoring of laser welding***, Workshop of the Centre of Excellence "Lapromat" on Laser Processing and Advanced Material Testing, Cedzyna, 2003.
11. B. Grabas, ***Spawanie laserowe i jego kontrolowanie***, Konferencja szkoleniowa "Badania mechanicznych właściwości materiałów i konstrukcji", Zakopane, 299-310, 2003.
12. B. Grabas, ***Wpływ położenia czujników temperatury na jakość kontrolowania spawania laserowego***, VII Sympozjum Techniki Laserowej, Świnoujście, 319-322, 2002.
13. A. Pokhmurska, Z. Mucha, B. Grabas, N. Chervinska, R. Krupa, Corrosion behaviour of titanium alloy after laser forming, ***Physico-Chemical Mechanics of Materials***, Tom: 1, 244-246, 2000.
14. B. Grabas, ***Modelowanie pól temperatury przy uwzględnieniu tłumienia wiązki laserowej w kanalikach parowym podczas spawania laserowego***, Solidification of Metals and Alloys, 2, 42, 297-307, 2000.
15. B. Grabas, ***Wykorzystanie powierzchniowych temperatur do kontrolowania głębokości spawania laserowego***, Sympozjum Naukowo-Techniczne "Technika laserowa w inżynierii powierzchni materiałów", Warszawa 1997, vol. 2, 31-38, 1997
16. B. Grabas, J. Dard-Thuret, M. Laurent, J.M. Pelletier, ***Influence of the Penetration Depth in Laser Welding on Surface Temperatures*** ICALEO'96 - PROCEEDINGS OF THE LASER MATERIALS PROCESSING CONFERENCE, Tom: 81, 36-45, 1996.

17. B. Grabas, *An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects*, AES-ATEMA International Conference Series - Advances and Trends in Engineering Materials and their Applications, 2013. 5-9.08.2013, 77-86, Toronto, Kanada
18. B. Grabas, M. Najgeburska, Ł. Śliwka, M. Maj, *Wpływ stopnia nagrzania powierzchni i prędkości obróbki na szerokość zahartowanej laserowo ścieżki*, VIII Sympozjum Techniki Laserowej, Świnoujście, 138-144, 2006.
19. B. Grabas, *Wykorzystanie modelu kondukcyjnego do obliczania kształtu spoin laserowych*, VIII Sympozjum Techniki Laserowej, Świnoujście, 145-150, 2006.

#### **d) udzielone patenty międzynarodowe lub krajowe**

1. B. Grabas, Patent PL 201106 „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych”, 2008.
2. B. Grabas, Patent PL 207358 ‘Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych’, 2010.
3. B. Grabas, Patent PL 210889 ‘Sposób zwiększania powierzchni czynnej elementów metalowych, zwłaszcza powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych’, 2011.
4. B. Grabas, Patent zagraniczny (Ukraina) nr 17601/ZA/13 "A method of increasing heat exchange surfaces and active surfaces of metal elements including, in particular, heat exchange surfaces", 2013. (Rozszerzenie ochrony patentowej)
5. Bogusław Grabas, Patent Europejski, nr 2521798, "A method of increasing heat exchange surfaces of elements made of metal or metal alloys ", 2014. Patent ten stanowi kontynuację ochrony wynalazku opisanego w patentach PL 207358 oraz PL 210889 rozszerzoną na następujące kraje : Polska, Niemcy, Francja, Wielka Brytania, Belgia, Hiszpania.

#### **e) wynalazki, wzory użytkowe i przemysłowe, które uzyskały ochronę i zostały wystawione na międzynarodowych lub krajowych wystawach lub targach**

Wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” chroniony obecnie wyżej wymienionymi patentami (ukraińskim oraz europejskim) został wystawiony na następujących międzynarodowych wystawach wynalazków:

- Międzynarodowa Wystawa Wynalazków i Innowacji, Warszawa, 2010.
- 62 Międzynarodowa Wystawa - Pomysły, Wynalazki, Nowe Produkty, iENA 2010, Norymberga, Niemcy.
- Międzynarodowy Salon Wynalazczości Concours-Lepine, 2011, Paryż, Francja

**f) Zestawienie publikacji po uzyskaniu stopnia doktora**

Typ publikacji	Publikacje indywidualne	Publikacje zbiorowe	$\Sigma$
Publikacje z listy A	3	3	6
Publikacje z listy B	3	3	6
Materiały z konferencji międzynarodowej, rejestrowane w bazie WoS	1	0	1
Pozostałe publikacje	12	9	21
Rozdziały w monografiach	0	4	4
Patenty	5	0	5
Zgłoszenia patentowe	6	0	6
$\Sigma$	<b>30</b>	<b>19</b>	<b>49</b>

**5.3. Sumaryczny impact factor publikacji według listy Journal Citation Reports (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania**

Pozycja	Rok	Liczba punktów	IF
1. B. Grabas, E. Mazur, <i>Obliczenia teoretyczne kształtu laserowej spoiny punktowej.</i> , Przegląd Elektrotechniczny, 84, 7, 126-128, 2008	2008	10	0
2. B. Grabas, <i>An evaluation of the use of laser-vibration melting to increase the surface roughness of metal objects.</i> Arch. Metall. Mater., 60, 1, 33-39, 2015.	2015	30	0
3. B. Grabas, <i>Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement.</i> Exp. Therm. Fluid Sci., 68, 499-508, 2015.	2015	35	2.12
4. B. Grabas, <i>Pyrometric temperature measurements with miniature cavity used as a blackbody in the calorimetric method for determining absorbed laser energy.</i> Exp. Therm. Fluid Sci., 74, 100-109, 2016	2016	35	2.83
5. B. Grabas, Sz. Tofil, W. Napadłek, <i>An analysis of laser welded NiCr-Pt micro joints on spark plug electrodes in biogas-fuelled engines,</i> Arch. Metall. Mater., 61, 2, 1163-1167, 2016.	2016	0	0.571
6. M. Piasecka, K. Strąk, B. Grabas, <i>Vibration-assisted laser surface texturing and electromachining for the intensification of boiling heat transfer in a minichannel.</i> Arch. Metall. Mater., 62, 4, 1983-1990, 2017.	2017	Brak danych	Brak danych
$\Sigma$		<b>110</b>	<b>5.521</b>

Sumaryczny *impact factor* (IF) publikacji zgodnie z rokiem wydania wynosi **5.521**.

#### **5.4. Liczba cytowań publikacji oraz indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS);**

Całkowita liczba cytowań w bazie Web of Science na dzień 23.04.2018 wynosi 26.

Liczba cytowań bez autocytowań wynosi 22.

#### **5.5. Indeks Hirscha opublikowanych publikacji według bazy Web of Science (WoS);**

Indeks Hirscha publikacji, h-index wynosi **4**.

#### **5.6. Kierowanie międzynarodowymi lub krajowymi projektami badawczymi lub udział w takich projektach**

1. Grant badawczy NCN, umowa nr **NN 503 199440**, „*Wykorzystanie laserowego przetapiania w obecności wibracji do zwiększenia powierzchni wymiany ciepła*”. Czas trwania 24.05.2011 – 23.05.2013 r. Udział w projekcie: **Kierownik**. Wysokość środków : 82 200 PLN.

2. Grant Patent Plus (MNiSW) nr 517-04, „*Wsparcie uzyskania ochrony patentowej na wynalazek Pt. ‘Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych’ i wsparcie jego komercjalizacji*”. Czas realizacji: 2.01.2010 – 31.12.2011 r. Udział w projekcie: **Kierownik**. Wysokość środków : 40 700 PLN.

3. Grant udzielony przez Ośrodek Przetwarzania Informacji nr UDA-POIG.01.03.02-00-065/12-02 „*Wsparcie procesu uzyskania ochrony na wynalazek pt. ‘Sposób zwiększania powierzchni czynnej elementów metalowych’*”. Czas realizacji: 27.03.2012 – 30.06.2015 r. Udział w projekcie: **Kierownik**. Wysokość środków : 56 000 PLN.

4. Projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr N50301231/1668 „*Opracowanie technologii laserowego kształtowania materiałów*” Czas trwania: 2006- 2009. Kierownik projektu: Prof. dr Zygmunt Mucha. Udział w projekcie: **Wykonawca**.

5. Grant wdrożeniowy (Narodowe Centrum Badań i Rozwoju) „*Technologie laserowego spawania dla energetyki i ochrony środowiska.*” Czas trwania: 01.10.2012 - 31.12.2016, Kierownik projektu: Prof. dr hab. inż. Bogdan Antoszewski. Udział w projekcie: **Główny wykonawca w charakterze kierownika grupy zadaniowej**. Wysokość środków: 3 480 892 PLN, w tym środki dla PŚK - 1 728 232 PLN.

6. Projekt badawczy NCN, umowa nr UMO 2013/09/B/ST8/02825, pt. *Wpływ rozwiniętych powierzchni grzejnych na wymianę ciepła przy wrzeniu w przepływie przez*

*mini przestrzenie*. Czas trwania: 07.03.2014 - 06.03.2017, Kierownik projektu: dr hab. inż. Magdalena Piasecka. Udział w projekcie: **Wykonawca**. Wysokość środków: 627 800 PLN.

**Kierowanie projektami badawczymi w ramach prac statutowych i własnych finansowanymi przez MNiSW :**

7. Praca własna ‘Optymalizacja hartowania laserowego. Wpływ parametrów obróbki laserowej na geometrię strefy zahartowanej i jakość hartowania laserowego’.

**Status: Kierownik pracy.**

8. Praca własna „ Wpływ parametrów laserowego przetapiania na własności cieplne obrabianego materiału”. **Status: Kierownik pracy.**

9. Praca własna, „Opracowanie metody pomiaru ilości zaabsorbowanej mocy laserowej przez obrabiane detale”. **Status Kierownik pracy.**

10. Praca statutowa "Teoretyczna i doświadczalna analiza zjawisk zachodzących podczas kształtowania wiązką laserową oraz badania manipulatorów do obróbki laserowej”.

**Status: Wykonawca.**

11. Praca statutowa „ Wpływ parametrów obróbki na jakość spoiny wykonanej spawaniem laserowym po okręgu”. **Status: Kierownik projektu**

12. Praca statutowa „ Opracowanie cieplnego kondukcyjnego modelu spawania laserowego po okręgu”. **Status: Kierownik projektu.**

13. Praca statutowa „Badania doświadczalne i modelowanie procesów laserowej obróbki materiałów”. **Status: Wykonawca.**

14. Praca statutowa, "Wpływ zwiększonych prędkości skanowania wiązki na kształt lica przetopienia laserowego”. **Status: Kierownik projektu.**

15. Praca statutowa, "Wpływ zwiększonych prędkości skanowania wiązki na kształt lica przetopienia laserowego dla stopów aluminium i wybranych stali szlachetnych".

**Status: Kierownik projektu.**

16. Praca statutowa, " Analiza możliwości wykorzystania drgań harmonicznnych do laserowo-wibracyjnego teksturowania powierzchni elementów metalowych".

Status: **Kierownik projektu.**

**5.7. Międzynarodowe lub krajowe nagrody za działalność naukową:**

**a) nagrody międzynarodowe**

1. Srebrny medal za wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na Międzynarodowej Wystawie Wynalazków i Innowacji, Warszawa, 2010.
2. Srebrny medal za wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na 62 Międzynarodowej Wystawie Pomysły, Wynalazki, Nowe Produkty iENA 2010, Norymberga, Niemcy.
3. Srebrny medal za wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na Międzynarodowym Salonie Wynalazczości Concours-Lepine, 2011, Paryż, Francja

#### **b) nagrody krajowe**

- 1) Wyróżnienie I edycji Konkursu Świętokrzyski Racjonalizator Urzędu Marszałkowskiego, Kielce 2009 za " Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych"
- 2) Zespołowa nagroda II stopnia J M Rektora Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach za działalność naukową i uzyskany patent "Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych", 2009
- 3) List gratulacyjny Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego za projekt pod nazwą "Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych" Warszawa, 2010.
- 4) Zespołowa nagroda II stopnia JM Rektora Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, za publikacje w znaczących czasopismach i patenty, 2011
- 5) Nagroda Główna IV edycji Konkursu Świętokrzyski Racjonalizator Urzędu Marszałkowskiego, Kielce 2012 za " Sposób zwiększania powierzchni czynnej elementów metalowych, zwłaszcza powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych”
- 6) Zespołowa nagroda III stopnia JM Rektora Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, za aktywną działalność w zakresie ubiegania się o środki finansowe w ramach konkursów Narodowego Centrum Badań i Rozwoju i Narodowego Centrum Nauki i patenty, 2014
- 7) Zespołowa nagroda II stopnia JM Rektora Politechniki Świętokrzyskiej w Kielcach, za działalność naukową, 2016

### **5.8. Wygłaszanie referatów na międzynarodowych lub krajowych konferencjach tematycznych**

#### **a) wygłaszanie referatów na międzynarodowych konferencjach:**



Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 2 referaty na międzynarodowych konferencjach naukowych oraz prezentowałem wyniki badań podczas sesji plakatowej na 2 konferencjach naukowych

**b) wygłaszanie referatów na konferencjach krajowych:**

Po uzyskaniu stopnia doktora wygłosiłem 5 referatów na krajowych konferencjach naukowych.

**6. Kryteria oceny w zakresie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy międzynarodowej habilitanta we wszystkich obszarach wiedzy**

**6.1. Uczestnictwo w programach europejskich i innych programach**

**Międzynarodowych lub krajowych**

- Brak

**6.2. Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych lub udział w komitetach organizacyjnych tych konferencji.**

Brałem udział w wyżej wymienionych międzynarodowych oraz krajowych konferencjach naukowych, natomiast nie brałem udziału w komitetach organizacyjnych tych konferencji.

**6.3. otrzymane nagrody i wyróżnienia**

- brak

**6.4. udział w konsorcjach i sieciach badawczych**

- brak

**6.5. kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych, a w przypadku badań stosowanych we współpracy z przedsiębiorcami**

- brak

**6.6. udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism**

- brak

**6.7. członkostwo w międzynarodowych lub krajowych organizacjach i towarzystwach naukowych**

- brak

**6.8. osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki**

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych jako adiunkt ( od roku 2016 jako starszy wykładowca) Katedry Inżynierii Eksploatacji i Przemysłowych Systemów Laserowych Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn Politechniki Świętokrzyskiej prowadziłem następujące zajęcia :

I. Zajęcia prowadzone na Wydziale Mechatroniki i Budowy Maszyn na specjalności Komputerowo Wspomagane Technologie Laserowe i Plazmowe :

1. Projektowanie procesów technologicznych obróbki laserowej i plazmowej - wykłady, ćwiczenia projektowe
2. Miernictwo laserowe – wykłady, ćwiczenia laboratoryjne
3. Podstawy konstrukcji systemów laserowych i plazmowych – wykład, ćwiczenia projektowe
4. Specjalne zastosowania laserów - wykład

II. Pozostałe zajęcia :

1. Technologie laserowe i plazmowe – wykład, ćwiczenia laboratoryjne
2. Technologie laserowej obróbki metali - ćwiczenia laboratoryjne
3. Metoda elementów skończonych - ćwiczenia laboratoryjne
4. Grafika inżynierska - ćwiczenia projektowe
5. Zapis konstrukcji - ćwiczenia projektowe
6. Technologie informatyczne – wykład, ćwiczenia laboratoryjne
7. Serwis pojazdów – ćwiczenia rachunkowe
8. Podstawy normalizacji i innowacji – wykład
9. Podstawy normalizacji – wykład
10. Skutki zagrożeń-oświetlenie – ćwiczenia laboratoryjne
11. Serwis maszyn – ćwiczenia projektowe
12. Eksploatacja urządzeń do obróbki plazmowej – wykłady, ćwiczenia laboratoryjne
13. Pomiarowe systemy laserowe – wykłady, ćwiczenia laboratoryjne
14. Laserowe technologie metali – wykład
15. Maszynoznawstwo – wykład
16. Interferometria laserowa w badaniach bezpieczeństwa konstrukcji – wykład, ćwiczenia laboratoryjne
17. Wentylacja, klimatyzacja i ogrzewanie - wykład, ćwiczenia laboratoryjne
18. Bezpieczeństwo transportu wewnętrznego - wykład
19. Prace przejściowe I i II

III. Przeprowadzenie szkolenia w ilości 30-stu godzin pt. "Najnowsza Technologia Laserowa" w ramach Projektu szkoleniowego "Nowe Technologie dla MSP". Działanie 8.1.1 Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Europejskiego Funduszu Społecznego, numer projektu WND-POKL.08.01.01-26-072/12 w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Okres szkolenia : 2014r. Zleceniodawca:

MULTIEDUKATOR Sp. z o. o.  
ul. 1-go Maja 124  
25-413 Kielce

## IV. Promotorstwo wyróżnionych prac dyplomowych:

**1. Praca dyplomowa magisterska:** Magdalena Najgeburska, 2004, „Wpływ parametrów technologicznych na jakość hartowania laserowego”, Nagroda Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn za zajęcie III miejsca w konkursie na wyróżniającą się pracę dyplomową. (18.11.2004)

**2. Praca dyplomowa magisterska:** Magdalena Maj, 2004, „Dobór parametrów technologicznych odpuszczania laserowego zahartowanych części metalowych”, Nagroda Dziekana Wydziału Mechatroniki i Budowy Maszyn za zajęcie III miejsca w konkursie na wyróżniającą się pracę dyplomową. (18.11.2004)

**6.9. opieka nad studentami**

Opiekun specjalności komputerowo wspomagane technologie laserowe i plazmowe na kierunku studiów Mechanika i Budowa Maszyn, w roku akademickim 2008/2009 oraz 2010/2011.

Od roku 2002 byłem promotorem obronionych 13 prac dyplomowych magisterskich oraz obronionych 13 prac dyplomowych inżynierskich.

**6.10. opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego, z podaniem tytułów rozpraw doktorskich**

Pełnię od roku 2012 funkcję promotora pomocniczego w przewodzie doktorskim mgr inż. Szymona Tofila, tytuł rozprawy : "Badanie trwałości laserowo spawanych nakładek na elektrody świec zapłonowych silników zasilanych paliwami gazowymi"

**6.11. staże w zagranicznych lub krajowych ośrodkach naukowych lub akademickich**

Odbyłem ośmiomiesięczny staż post-doktorancki na Uniwersytecie National Sun Yat-Sen University, Kaohsiung, Taiwan, Laboratory of Heat Transfer. Opiekun : profesor Shou-Shing Hsieh. Okres trwania stażu : 1.12.2998 – 31.07.1999.

**6.12. wykonanie ekspertyz lub innych opracowań na zamówienie organów władzy publicznej, samorządu terytorialnego, podmiotów realizujących zadanie publiczne lub przedsiębiorców**

Wykonałem dwie ekspertyzy zamawianych przez przedsiębiorców prywatnych :

1. Ekspertyza technologiczna "Opinia o innowacyjności w skali kraju planowanego wdrożenia nowoczesnej technologii wytwarzania podzespołów urządzeń grzewczych". Okres wykonania ekspertyzy: 1.05. 2008 - 31.05.2018. Zleceniodawca :

PWTK TERMO-TECH Sp. z o. o,  
ul. Odlewnicza 1  
26-220 Stąporków

2. Ekspertyza technologiczna "Analiza symulacyjna potwierdzająca możliwość wykonania stanowiska pilotażowego do obróbki ostrzy narzędzi skrawających z diamentu polikrystalicznego oraz ogólnych założeń nowej technologii - przy wykorzystaniu lasera włóknowego". Okres wykonania ekspertyzy: 18.08.2011 - 04.11.2011. Zleceniodawca:

J.G. Service  
ul.Kuźnicza 4  
21-040 Świdnik

#### **6.13 Udział w zespołach eksperckich i konkursowych**

- Brak

#### **6.14. recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych oraz publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych**

-Brak

### **7. Inne formy działalności**

1. Udział w Międzynarodowych Targach Kooperacji Przemysłowej MIDEST 2011 w Paryżu we Francji na zaproszenie Ambasady RP w Paryżu. Został zaprezentowany wynalazek „Sposób zwiększania powierzchni wymiany ciepła elementów metalowych” na Międzynarodowych Targach Kooperacji Przemysłowej w Paryżu w dniach 15-18 listopada 2011. Stroną zapraszającą była Ambasada Polska w Paryżu w osobie Radcy-Ministra, Kierownika Wydziału Promocji Handlu i Inwestycji Pana Andrzeja Szteligi. Ambasada Polska zapewniła stanowisko wystawowe oraz niezbędną pomoc na czas trwania targów.

2. Wyróżnienie mojego artykułu „*Vibration-assisted laser surface texturing of metals as a passive method for heat transfer enhancement*” przez kanadyjskiego wydawcę *Advances In Engineering* w postaci zamieszczenia go w specjalistycznej, utworzonej głównie na potrzeby środowiska przemysłowego, kanadyjskiej bazie danych artykułów naukowych o kluczowym znaczeniu innowacyjnym.

3. Udział w 193-godzinnym programie szkoleniowo-doradczym „Od pomysłu do komercjalizacji” organizowanym przez Centrum Transferu Technologii Uniwersytetu Łódzkiego. Program przekazany przez Uniwersytet Tekszański w Austin, USA był współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Kierownikiem programu był dr T. Bartosz Kalinowski (Uniwersytet Łódzki). Okres trwania szkolenia: 1.10.2009 - 31.01.2010.