

Sara Dudzińska, Daniel Grochała, Emilia Bachtia-Radka

BADANIA NAPRĘŻEŃ W WARSTWIE WIERZCHNIEJ CZĘŚCI KSZTAŁTOWANYCH W SPOSÓB HYBRYDOWY

DOI: 10.24136/atest.2018.299

Data zgłoszenia: 30.08.2018. Data akceptacji: 25.09.2018.

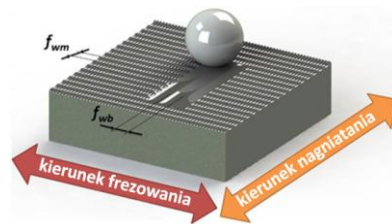
W artykule omówiony został aspekt naprężeń w warstwie wierzchniej części kształtowanych w sposób hybrydowy, gdzie elementy są najpierw frezowane, a następnie nagniatane. Naprężenia w warstwie wierzchniej odgrywają bardzo ważną rolę, ponieważ są odpowiedzialne m.in. za rozwój pęknięć, korozję i kawitację. Charakteryzacja i badania naprężeń w warstwie wierzchniej umożliwiają predykcję zachowań części podczas eksploatacji. Podczas prowadzonych badań potwierdzono wprowadzenie korzystnych, ściskających naprężeń w warstwie wierzchniej. Dla różnych średnic kulek nagniatających odnotowano istotne różnice wartości naprężeń wywołane zmienną wartością nacisków przy tej samej wartości siły nagniatania F_n .

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, naprężenia własne, hybrydowe technologie, metody dyfrakcji

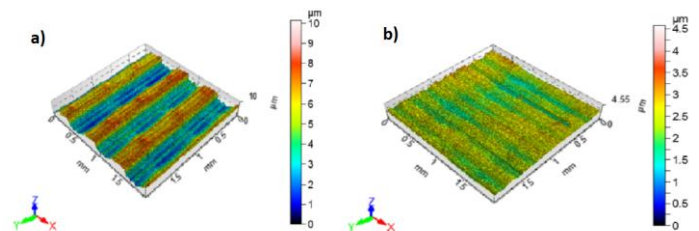
WSTĘP

Coraz szybszy rozwój w branży motoryzacyjnej skutkuje rozwojem takich metod obróbki części, w których łączone jest kilka zabiegów, w których na skutek oddziaływania różnych zjawisk fizycznych następuje modyfikacja stanu SGP. Takie metody obróbkowe nazywane są metodami hybrydowymi. Łączenie kilku zabiegów obróbkowych w jednej operacji w branży AUTOMOTIVE ma na celu przede wszystkim skrócenia czasu produkcji detalu, zmniejszenia kosztów produkcji oraz oczywiście spełnienia wysokich wymagań klienta. Zdarzają się również i takie sytuacje, że niemożliwe jest zastosowanie konwencjonalnych narzędzi oraz obróbek.

W branży motoryzacyjnej, gdzie konieczne jest uzyskanie bardzo gładkich elementów (jak np. elementy kokpitu wykonane z tworzyw sztucznych) częstym sposobem obróbki powierzchni części (również form wtryskowych i matryc) jest stosowanie hybrydowych metod obróbki łączących frezowanie z nagniataniem [1-3]. Podczas zastosowania takiej obróbki dochodzi do niwelowania wysokich pików powierzchni, a następnie po ich uplastycznieniu podczas nagniatania następuje wypełnienie pewną niewielką objętością materiału lokalnie przylegających do piku dolin. Efekt nagniatania zależy oczywiście w dużej mierze od twardości materiału i chropowatości ukształtowanej w wyniku zabiegu poprzedzającego nagniatanie (tj. frezowania). Istotna jest również wzajemna trajektoria obu narzędzi [4]. Na rysunku 1 przedstawiono kinematykę hybrydowego procesu obróbki powierzchni. A na rysunku 2 przedstawiono efekt obróbki nagniataniem zarejestrowany podczas wcześniejszych badań.

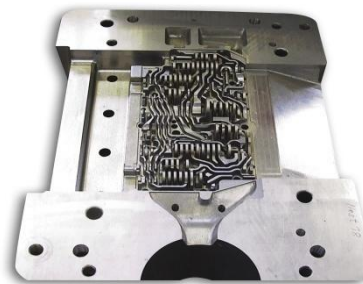


Rys. 1. Kinematyka hybrydowego procesu obróbki powierzchni: f_{wm} - wierszowanie przy frezowaniu, f_{wb} - wierszowanie przy nagniataniu [4]



Rys. 2. Powierzchnia próbki stali 42CrMo4 o twardości 35HRC a) po frezowaniu $f_z=0,1\text{mm}$; $v_c=110\text{m/min}$ f_{wm} of 0.3mm b) po nagniataniu z siłą $F_b=800\text{N}$ [5]

Do częstych operacji technologicznych i zadań jest obróbka powierzchni równoległych do osi wrzeciona obrabiarki ($\alpha = 90^\circ$). Wówczas nie ma możliwości normalnego ustawienia nagniataków prostych i stosuje się nagniataki kątowe (rys.3)



Rys. 3. Forma odlewnicza korpusu zaworu logicznego

Zazwyczaj po zastosowaniu takiej obróbki charakteryzowany, a także sprawdzany jest efekt gładkościowy. Ocena struktury geometrycznej powierzchni stanowi co raz to lepiej poznawaną odrębną dziedzinę metrologii. Mniej uwagi zarówno w badaniach jak i w praktyce przemysłowej przykładane jest do tematu powstających po

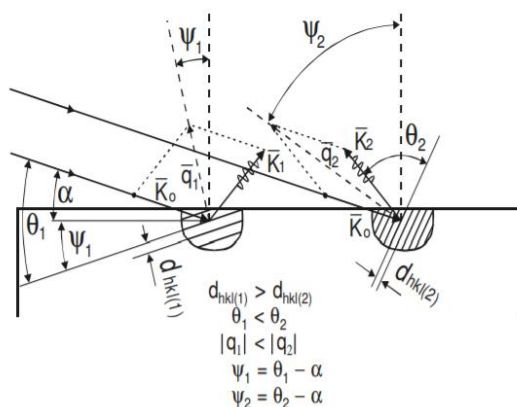
obróbce naprężeń w warstwie powierzchniowej. Tymczasem naprężenia te odgrywają bardzo ważną rolę, ponieważ to one są często odpowiedzialne za rozwój pęknięć, korozję i kawitację (np. w polu powierzchni wtrysku w przypadku form, także do aluminium, narzędzi prasowych i noży rdzeniowych). Szczególnie ważne istotne jest to podczas łączenia kształtującego frezowania z wykańczającym nagniataniem, gdzie efekt gładkościowy zależy również od użytej siły podczas nagniatania [4,5]. W wyniku nieodpowiednio dobranych sił podczas obróbki część może stracić swoje właściwości eksploatacyjne w dość szybkim czasie mimo początkowego zgodnego z oczekiwaniami SGP. Właściwe zrozumienie mechanizmów odpowiedzialnych za pochodzenie i rozwój naprężeń przyczyniać się może do poprawy właściwości funkcjonalnych i eksploatacyjnych zarówno powstałych części, jak również wykorzystywanych do ich produkcji narzędzi. Dlatego przeprowadzono badania mające na celu określenie stanu naprężeń w elementach powstałych w wyniku kształtowania hybrydowego.

1. METODYKA BADAŃ

W przeprowadzonych badaniach wykorzystano metodę opartą na geometrii stałego kąta padania – metoda $g\text{-sin}^2\Psi$ [6]. Metoda ta charakteryzuje się odpowiednimi nachyleniami wektorów dyfrakcji wobec powierzchni (o kąt ψ i φ) (rys.4) [6-8]. Kąt nachylenia ψ powiązany jest zależnością z kątem dyfrakcji Bragga Θ i kątem padania α (1) [6-7]:

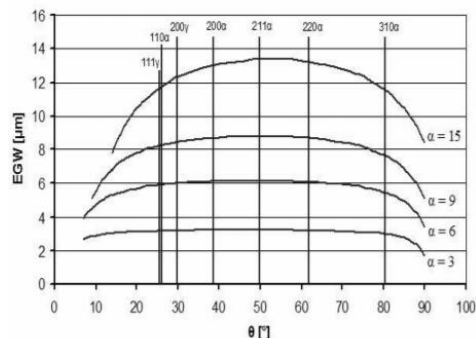
$$\psi = \alpha - \Theta \quad (1)$$

Przy dużych kątach dyfrakcji Θ i małych kątach padania, płaszczyzny uginające mogą być praktycznie prostopadłe do powierzchni próbki, co pozwala na osiągnięcie dość dobrych wyników przy mierzeniu naprężeń w warstwach powierzchniowych.



Rys. 4. Schemat dyfrakcji w geometrii stałego kąta padania w ujęciu wektorowym [6-7].

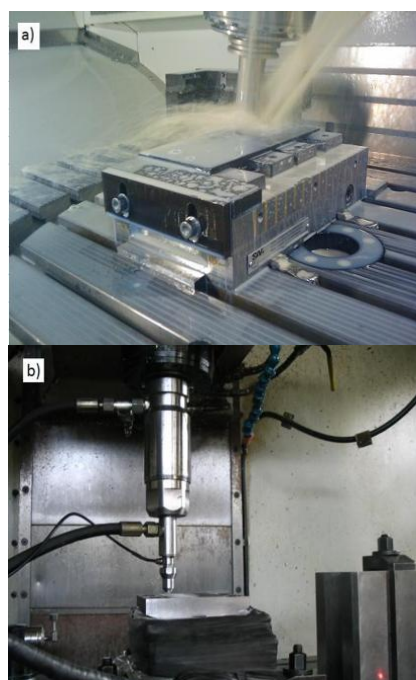
Zaletą tej metody jest praktycznie stała głębokość pomiaru, która może ustalona poprzez dobór długości fali oraz kąt padania [7] (rys.5)



Rys. 5 Efektywne głębokości wnikania dla geometrii stałego kąta padania [7].

2. MATERIAŁ BADAWCZY

Badania naprężeń wykonano na próbkach o wymiarach 10x10x7 mm z dwóch gatunków stali C45 (o twardości 20HRC) oraz 42CrMo4. Próbki ze stali 42CrMo4 ulepszone cieplnie do twardości 35±2HRC. Przygotowane próbki z obu gatunków stali frezowano na centrum obróbkowym DMG DMU 60MONOBLOCK, przy pochylonej o 15° osi wrzeciona. Frezowanie prowadzono głowicą torusową (WNT R1000G.42.6.M16.IK) z sześcioma płytkami skrawającymi o średnicy $d_p=10$ mm (RD.X1003 MOT – WTN1205). Powierzchnię próbek wyrównano skrawając z głębokością $a_p=0.5$, prędkość skrawania podczas frezowania wynosiła $v_c=110$ m/min, posuw na ostrze $f_z=0.1$ mm a posuw przy wierszowaniu $f_{wf}=0,1$ mm. Do nagniatania zastosowano jednokulkowe narzędzie hydrostatyczne z siłownikiem miechowym [x], zakończone kulką z ceramiki ZrO2 o średnicy $d_b=10$ mm. Prędkość nagniatania v_b wynosiła 8 m/min a posuw poprzeczny nagniatania $f_{wb}=0.02$ mm. Nagniatanie prowadzono z siłami F_b równymi 500; 700; 900; 1100; 1300 N. Na rysunkach poniżej zaprezentowano kolejne etapy przygotowania próbek.



Rys. 6 Przygotowanie próbek a) kształtujące frezowanie na centrum obróbkowym DMG DMU 60MONOBLOCK, przy pochylonej o 15° osi wrzeciona, b) wykańczające nagniatanie na 3 osiowym centrum obróbkowym MIKRON VCE 500 [5]

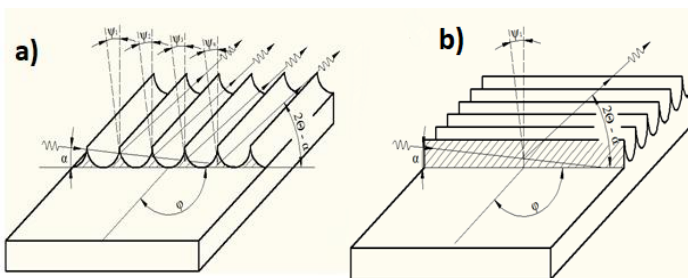
3. METODYKA POMIARÓW

Pomiary naprężeń w warstwie powierzchniowej wykonano na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie za pomocą urządzenia X'Pert System PRO firmy Panalytical wyposażone w lampę CoKa o długości fali $\lambda = 1,78901 \text{ [Å]}$ (rys. 7)



Rys. 7. Dyfraktometr rentgenowski X'Pert PRO firmy Panalytical

Próbki ustawiano tak aby kierunek nagniatania był taki sam jak kierunek padania wiązki promieniowania rentgenowskiego (rys. 8). Dzięki takiemu ustawieniu możliwe było maksymalne ograniczenie błędów wywołanych teksturą powierzchni [8-9]



Rys. 8. Sposób ustawienia próbki względem wiązki padającej w przestrzeni goniometru: a) poprzecznie do śladów nagniatania, b) wzdłużnie do śladów nagniatania [8-9]

Dyfraktometr ustawiono na stałą wartość kąta padania $\alpha = 7^\circ$. Widma wykonano w przedziale kątowym $46-130^\circ 2\theta$ z krokiem $0,02^\circ$ czas zliczania ustawiono 3 [sek.]. Położenie refleksów dopasowano w programie ProfileFit.

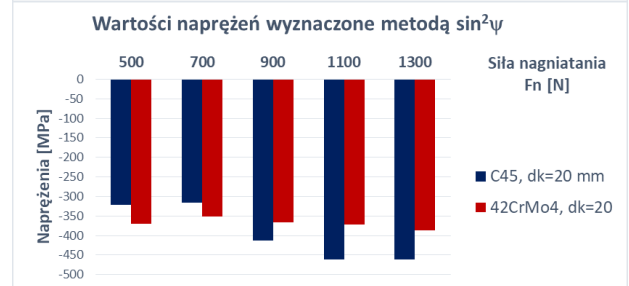
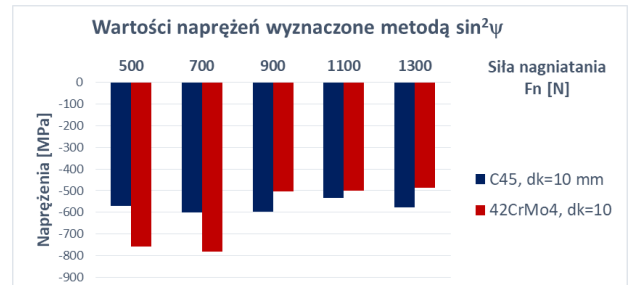
4. WYNIKI POMIARÓW

W tabeli 1 przedstawiono zmierzone wartości naprężeń dla obu typów materiału po obróbce frezowaniem i nagniataniem kulką o śr. 10 i 20 mm.

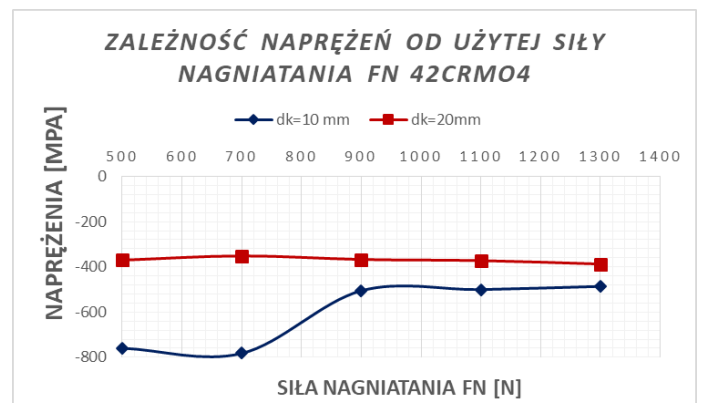
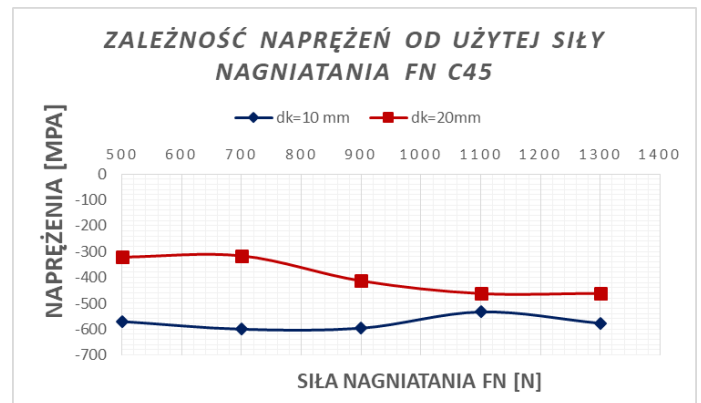
Tabela 1. Wartości naprężeń wyznaczone metodą $g\text{-sin}^2\psi$, przy kącie padania wiązki $\alpha = 7^\circ$

Siła nagniatania Fn [N]	C45 (20 HRC)		42CrMo4 (35 HRC)	
	Naprężenia [MPa]		Naprężenia [MPa]	
	dk=10 [mm]	dk=20 [mm]	dk=10 [mm]	dk=20 [mm]
500	-570	-321	-759	-370
700	-600	-316	-782	-351
900	-596	-413	-505	-367
1100	-533	-462	-500	-372
1300	-577	-461	-486	-387

We wszystkich przypadkach podczas badań uzyskano ujemne wartości naprężeń, co oznacza, że w warstwie wierzchniej występujące naprężenia są naprężeniami ściskającymi. Na rysunku 9 przedstawiono porównanie wyznaczonych wartości naprężeń dla stali C45 oraz 42CrMo4 po nagniataniu z różnymi wielkościami siły Fn kulką o średnicy 10 oraz 20mm. Na rysunku 10 przedstawiony wykres zależności zmierzonych naprężeń od użytej siły nagniatania Fn dla obu gatunków stali.



Rys. 9. Wartości naprężeń wyznaczone metodą $g\text{-sin}^2\psi$ przy kącie padania wiązki $\alpha = 7^\circ$



Rys.10. Zależność naprężeń od użytej siły nagniatania F_n dla a) materiału C45 (20 HRC); b) materiału 42CrMo4 (35 HRC)

Jak widać na zaprezentowanych wykresach w wybranym przedziale użytych sił F_n rozrzut uzyskanych wartości nie jest duży, co daje przesłankę ku temu, by stwierdzić, że siły nagniatania z zastosowanego przedziału nie wpływają istotnie na wartości zarejestrowanych naprężeń. Najmniejszy rozrzut wartości zaobserwowano w przypadku próbek ze stali 42CrMo4 nagniatanych narzędziem o średnicy 20 mm. W przypadku próbek z tego samego materiału nagniatanych kulką o średnicy 10 mm zarejestrowano rozrzut w uzyskanych wartościach naprężeń na poziomie ok. 300 MPa (różnica ok. 40% w stosunku do największych wartości naprężeń). Takie wyniki mogą być związane z relaksacją naprężeń lub przemianami strukturalnymi. W pozostałych przypadkach rozrzuty wartości uzyskanych naprężeń wynoszą ok. 70 MPa (stal C45, narzędzie o średnicy 10mm), 145 MPa (stal C45, narzędzie o średnicy 20mm). W przypadku obu materiałów bezwzględne wartości naprężeń powierzchni obrabianych narzędziem o średnicy 10 [mm] są większe niż po obróbce narzędziem o średnicy 20 [mm]. W większości przypadków wraz ze wzrostem siły nagniatania rosną wartości powstałych naprężeń w materiale.

PODSUMOWANIE

W wyniku przeprowadzonego eksperymentu stwierdzono występowanie korzystnych ściskających naprężeń w warstwie wierzchniej elementów obrabianych w sposób hybrydowy. W przypadku obu badanych materiałów (stal C45 oraz 42CrMo4) przy zastosowaniu różnych średnic kulek nagniatających zauważono różnice wartości naprężeń wywołane zmienną wartością nacisków przy tej samej wartości siły nagniatania F_n . W trzech na cztery przypadki zarejestrowano brak istotnego wpływu siły nagniatania F_n użytej w zakresie 500-1300N na zmierzone wartości naprężeń w badanych próbkach, co jest pozytywnym wynikiem. Stanowić to bowiem może zabezpieczenie części przed wprowadzeniem stanu naprężeń który mógłby powodować niepożądane zjawiska na powierzchni gotowego wyrobu. Uzyskane wyniki badań nie pozwalają jednakże na jednoznaczny dobór bezpiecznej wartości siły nagniatania podczas hybrydowej obróbki, która dawałaby korzystny przebieg rozkładu naprężeń w warstwie wierzchniej. Na podstawie przeprowadzonych badań nie można również stwierdzić, że uzyskany stan naprężeń jest następstwem obróbki nagniataniem z przyjętymi parametrami. Kolejnym krokiem (już trwającym) jest zbadanie stanu naprężeń powierzchni po frezowaniu i następnie nagniataniu oraz zbadaniu korelacji pomiędzy zmianami chropowatości powierzchni po kolejnych zabiegach (frezowania i nagniatania z różnymi wartościami sił F_n) a wartościami naprężeń po nagniataniu.

Dalsze badania nad tym zjawiskiem są niezbędne do głębszego wglądu w mechanikę pochodzenia i rozwój naprężeń. Konieczne są dalsze badania w celu ustalenia zależności pomiędzy niebezpiecznym naprężeniem w powierzchniowej warstwie obrabianego przedmiotu, jego głębokością, siłą nagniatania i maksymalną dopuszczalną wysokością chropowatości, którą można wygładzić.

BIBLIOGRAFIA

1. Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Munoa J., Sanchez J.A.: Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing, International Journal of Machine Tools & Manufacturing 2005, 45, p.1659-1668
2. Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Sanchez J.A., Arana J.L.: The effect of ball burnishing on heat-treated steel and inconel 718 milled surfaces, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2007r., 32, p.958-968
3. El-Taweel T.A, El-Axir M.H.: Analysis and optimization of the ball burnishing process through the Taguchi technique, International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2009, 41, p. 301–310, DOI 10.1007/s00170-008-1485-6
4. Bachtiaik-Radka E., Dudzińska S., Grochała D., Berczyński S., Olszak W.: The influence of CNC milling and ball burnishing on shaping complex 3D surfaces, Surface Topography: Metrology and Properties no.015001, 5/2017
5. Dudzińska S., Szydłowski M., Grochała D., Bachtiaik-Radka E.: Application of correlation function for analysis of surface structure shaping by hybrid manufacturing technology, Advances in Manufacturing, 2017, 651-659
6. Senczyk D.: „Podstawy tensometrii rentgenowskiej”. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2005r. ISBN 83-7143234-7.
7. Skrzypek S.J., Zębala W.: zastosowanie nieniszczących metod dyfrakcyjnych do jakościowej oceny warstw wierzchnich (WW), Archiwum Odlewnictwa, Rocznik 6, Nr 21(1/2), 2006, 427-434
8. Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z.: Stress in the surface layer of objects burnished after milling, International Journal Of Advanced Manufacturing Technology, Volume: 72, Issue: 9-12, 2014, 1655-1663
9. Grochała D (2011) Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi powierzchni przestrzennych złożonych na frezarkach CNC Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie <http://zbc.ksiaznica.szczecin.pl/Content/24025/Praca+dokt+D.+Grocha%C5%82a.pdf>

Research on stresses in the top layer of parts shaped in a hybrid technology

In this paper was presented the aspect of stress in the top layer part shaped in a hybrid technology, where the elements are first milled and then burnished. Stresses in the surface layer play a very important role because they are responsible, among others, for the development of cracks, corrosion and cavitation. Characterization and stress research in the surface layer allow prediction of parts behavior exploitation. During the research was confirmed the being of positive, compressive stresses in the surface layer. For the different diameters of the burnishing balls there were significant differences in stress values due to the variable pressure value at the same value of the burnishing force F_n .

Keywords: surface layer, residual stress, hybrid manufacturing, diffraction methods

Autorzy:

mgr inż. **Sara Dudzińska** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, sara.dudzinska@zut.edu.pl

dr inż. **Daniel Grochała** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, daniel.grochala@zut.edu.pl

mgr inż. **Emilia Bachtiaik-Radka** – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, emilia.bachtiaik-radka@zut.edu.pl